

METODE PERENCANAAN DAN PERSYARATAN BALOK TERLENTUR

2.1. PENDAHULUAN

Bila dua jenis bahan yang berbeda seperti baja dan beton bekerja bersama, analisa kekuatan sebagian bersifat empiris. Prinsip dan metoda secara terus menerus disempurnakan selaras dengan kemajuan penelitian. Sekarang desain struktur beton telah berubah, dari yang sebelumnya menitikberatkan pada desain komponen secara individual, menjadi desain struktur secara keseluruhan sebagai suatu sistem. Hal ini tercakup dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847-2019 [15] “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan”. SNI ini merupakan revisi dari SNI 2847:2013 berdasarkan Keputusan Kepala Badan Standardisasi Nasional, 2019. SNI 2847-2019 menjadi dasar pada uraian pada Buku ini yang selanjutnya disebut sebagai SNI. Standar ini merupakan modifikasi ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) dan Komentar (ACI 318M-14).

2.2. PEMBEBANAN DAN SISTEM STRUKTUR

Struktur bangunan misalnya Gedung, terdiri dari beberapa elemen struktur yang digabung sehingga harus dipandang sebagai suatu sistem. Sistem struktur meliputi a) hingga g) (Pasal 4.4.1) [15]: a) Konstruksi pelat lantai dan pelat atap, baik pelat satu-arah maupun pelat dua-arah, b) Balok dan pelat berusuk, c) Kolom, d) Dinding, e) Diafragma, f) Fondasi, g) *Joint*, sambungan (*connections*), dan angkur. Masing-masing elemen struktur memiliki peran dan fungsi tersendiri namun satu sama lain terhubung untuk menyalurkan gaya dari satu komponen ke komponen lain sehingga merupakan suatu sistem.

Setiap komponen struktur memiliki peran yang berbeda di setiap bangunan, tergantung pada kebijaksanaan perencana, namun harus memenuhi semua persyaratan pendetailan dari sistem struktur dimana komponen tersebut menjadi bagiannya. *Joint* dan sambungan adalah lokasi-lokasi bertemunya komponen-komponen, atau bagian yang digunakan untuk menghubungkan satu komponen ke komponen lainnya. Tapi perbedaan antara komponen, *joint* dan sambungan dapat bergantung pada bagaimana struktur diidealisasikan. Istilah “komponen” umumnya mengacu pada “komponen struktur, *joint*, dan sambungan struktur.”

Meskipun standar ini disusun dengan mempertimbangkan bahwa suatu sistem struktur memiliki komponen-komponen ini, juga dimungkinkan menggunakan konfigurasi lainnya karena tidak semua tipe komponen struktur digunakan dalam semua sistem struktur pada bangunan. Pemilihan tipe komponen yang digunakan pada proyek tertentu dan peran dari komponen-komponen tersebut dilakukan oleh perencana ahli bersertifikat dengan tetap memenuhi ketentuan di dalam standar ini (R4.4) [15].

Sistem struktur harus didesain untuk menahan beban terfaktor sesuai dengan kombinasi pembebanan pada Pasal 4.3 dan Pasal 5 tanpa melebihi kekuatan desain komponen yang sesuai, dengan mempertimbangkan satu atau lebih lintasan beban yang tidak terputus dari titik asal pembebanan sampai ke titik akhir (Pasal 4.4.4) [15]. Sistem struktur harus didesain untuk mengakomodasi perubahan volume dan penurunan tidak seragam yang mungkin terjadi (Pasal 4.4.5). Perubahan volume terjadi oleh susut, rangkai atau karena perubahan temperatur

(R4.4.5). Setiap struktur harus termasuk dalam salah satu Kategori Desain Seismik (KDS) yang ditentukan berdasarkan SNI 1726 (Pasal 4.4.6.1). Persyaratan desain di dalam standar ini didasarkan KDS yang dikenakan pada bangunan. Secara umum, KDS berkaitan dengan tingkat risiko seismik, tipe tanah, okupansi dan penggunaan bangunan. Penentuan KDS suatu bangunan mengacu pada peraturan umum gedung lainnya. Jika peraturan gedung lainnya tidak tersedia, SNI 1726 dapat dijadikan acuan (R4.4.6.1).

Semua komponen struktur dan sistem struktur harus dianalisis terhadap pengaruh-pengaruh maksimum dari beban termasuk pengaturan beban hidup sesuai (Pasal 6.2.2). Prosedur analisis struktur harus memenuhi persyaratan kompatibilitas (*compatibility*) deformasi dan keseimbangan gaya (Pasal 4.5.1).

2.3. KOMBINASI BEBAN

Beban dan kombinasi beban yang dipertimbangkan dalam desain harus sesuai dengan Pasal 5. Ketentuan dalam Pasal 5 didasarkan pada SNI 1726 dan SNI 1727. Beban rencana termasuk, namun tidak terbatas pada, beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, pengaruh prategang, beban *crane*, vibrasi, beban impak, susut, perubahan temperatur, rangkai, perubahan volume, dan penurunan tidak seragam pada sistem fondasi. Beban- beban khusus lain dapat ditentukan oleh perencana ahli bersertifikat (Pasal 4.3.1).

Kombinasi beban ditentukan berdasarkan beban utama. Kekuatan perlu U adalah beban atau kombinasi beban yang diberi faktor. Faktor tersebut untuk memberikan keamanan. Kekuatan perlu U harus paling tidak sama dengan pengaruh beban terfaktor dalam Tabel 5.3.1 SNI [15], dengan pengecualian dan tambahan dalam Pasal 5.3.3 hingga Pasal 5.3.12 (Pasal 5.3.1) atau Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kombinasi beban

Kombinasi Beban	Beban utama
$U = 1,4 D$	D
$U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$	L
$U = 1,2 D + 1,6 (L \text{ atau } R) + (1,0 L \text{ atau } 0,5 W$	L atau R
$U = 1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$	W
$U = 1,2 D + 1,0 E + 1,0 L$	E
$U = 0,9 D + 1,0 W$	W
$U = 0,9 D + 1,0 E$	E

- D : beban mati
- L : beban hidup layan
- L_r : beban hidup atap layan
- R : beban hujan kumulatif layan
- W : beban angin
- E : beban gempa

Asumsi pembebanan pada balok sebagai berikut (Pasal 6.4 SNI):

- a) Momen positif maksimum M_u di dekat tengah bentang terjadi dengan beban hidup terfaktor L yang bekerja penuh pada bentang dan pada bentang yang berselang-seling.

- b) Momen negatif maksimum M_u di tumpuan terjadi dengan beban hidup terfaktor L yang bekerja penuh hanya pada bentang yang berdekatan.

2.4. KEMAMPUAN LAYAN DAN INTEGRITAS STRUKTUR

2.4.1. Kemampuan Layan

Kemampuan layan mengacu pada kemampuan sistem struktur atau komponen struktur yang menunjukkan perilaku dan fungsi sesuai dengan yang diharapkan ketika beban bekerja. Keandalan suatu struktur selain kekuatannya juga kemampuannya untuk berdeformasi tanpa rusak. Sehingga kemampuan layan merujuk pada permasalahan seperti defleksi dan retak disamping permasalahan lainnya (R4.7).

Evaluasi kinerja saat kondisi beban layan diterima harus mempertimbangkan gaya reaksi, momen, gaya torsi, gaya geser, dan gaya aksial yang ditimbulkan oleh prategang, rangkak (*creep*), susut (*shrinkage*), perubahan temperatur, deformasi aksial, kekangan dari komponen struktur yang tersambung, dan penurunan fondasi (Pasal 4.7.1).

2.4.2. Integritas Struktur

Integrasi struktur mempengaruhi kemampuan layan atau keandalannya dalam menahan beban tetap dan beban lateral seperti angin dan gempa. Sebagai suatu sistem secara keseluruhan harus mampu menahan semua kemungkinan beban yang dapat terjadi. Tulangan dan sambungan harus didetailkan untuk mengikat bangunan sebagai satu kesatuan secara efektif serta untuk meningkatkan integritas struktural bangunan secara keseluruhan (Pasal 4.10.1.1) dan meningkatkan kemampuan berdeformasi. Persyaratan integritas struktural bertujuan untuk meningkatkan redundansi dan daktilitas melalui pendetailan penulangan dan sambungan, sehingga dalam kondisi komponen penopang utama mengalami kerusakan atau menerima beban melebihi kondisi normal, kerusakan yang terjadi bisa dilokalisasi dan struktur memiliki kemampuan mempertahankan stabilitas secara keseluruhan yang lebih baik (R4.10.1.1). Pada tumpuan tidak menerus, tulangan longitudinal diangkur seperti disyaratkan Pasal 9.7.7.4 (R 9.7.7.2).

Untuk balok sepanjang keliling struktur, tulangan integritas struktur harus sesuai Pasal 9.7.7.1.

- a) Sekurang-kurangnya seperempat dari tulangan maksimum momen positif, namun tidak kurang dari dua tulangan atau *strand*, harus menerus.
- b) Sekurang-kurangnya seperenam tulangan momen negatif tumpuan, namun tidak kurang dari dua tulangan atau *strand*, harus menerus.
- c) Tulangan longitudinal integritas struktur harus dikelilingi oleh sengkang tertutup sesuai Pasal 25.7.1.6 atau sengkang tertutup sepanjang bentang bersih balok.

Tulangan integritas struktur longitudinal harus melewati daerah yang dibatasi oleh tulangan longitudinal kolom (Pasal 9.7.7.3). Tulangan integritas struktur longitudinal pada tumpuan tidak menerus harus diangkur untuk menyalurkan f_y pada muka tumpuan (Pasal 9.7.7.4). Jika sambungan diperlukan tulangan menerus sebagai integritas struktur, tulangan harus disambung sesuai Pasal 9.7.7.5 yaitu:

- a) Tulangan momen positif harus disambung pada atau dekat tumpuan.
- b) Tulangan momen negatif harus disambung pada atau dekat tengah bentang.

2.5. METODE ANALISIS

2.5.1. Metode Analisis yang Diizinkan

Metode analisis yang diizinkan oleh Pasal 6.2.3. ini harus menggunakan a) hingga e):

- a) Metode penyederhanaan untuk analisis balok menerus dan pelat satu arah terhadap beban gravitasi
- b) Orde pertama
- c) Orde kedua elastis
- d) Orde kedua inelastis
- e) Elemen hingga

Orde pertama dan kedua, biasanya dipergunakan untuk menganalisis kolom:

- Analisis orde pertama memenuhi persamaan keseimbangan menggunakan geometri struktur tak terdeformasi (*undeformed*). Bila hanya hasil orde pertama dipertimbangkan, pengaruh kelangsingan tidak diperhitungkan.
- Analisis orde kedua memenuhi persamaan keseimbangan menggunakan geometri struktur terdeformasi (*deformed*), dan pengaruh kelangsingan diperhitungkan.

2.5.2. Metode Pendekatan untuk Analisis Balok Menerus

Balok terutama menahan momen (M), geser (V), dan puntir (T). Untuk menghitung M_u dan V_u akibat beban gravitasi diizinkan menggunakan ketentuan ini untuk balok menerus dan pelat satu arah asalkan syarat a) sampai e) dipenuhi (Pasal 6.5.1).

- a) Komponen struktur adalah prismatis
- b) Beban terdistribusi merata
- c) Beban hidup tak terfaktor tidak melebihi tiga kali beban mati tak terfaktor ($L \leq 3D$)
- d) Terdapat dua bentang atau lebih
- e) Panjang bentang terbesar terhadap panjang bentang terpendek dari dua bentang yang bersebelahan tidak lebih dari 20 %.

Momen pendekatan tersebut disajikan pada Tabel 6.5.2 [15] atau Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Momen pendekatan untuk analisis balok menerus dan pelat satu arah nonprategang

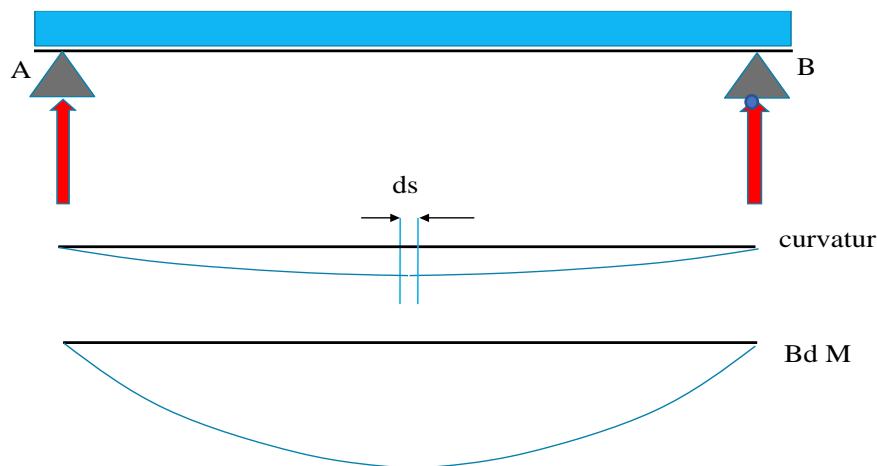
Momen	Lokasi	Kondisi	M_u
Positif	Bentang ujung	Ujung tidak menerus dan monolit dengan perletakan	$w_u l^2 / 14$
		Ujung tidak menerus dan tidak terkekang	$w_u l^2 / 11$
	Bentang tengah	Semua	$w_u l^2 / 16$
	Muka interior dari pendukung exterior	Balok menyatu secara monolit dengan balok spandrel pendukung	$w_u l^2 / 24$
		Balok monolit dengan kolom pendukung	$w_u l^2 / 16$
	Muka exterior dari pendukung interior pertama	Dua bentang	$w_u l^2 / 9$
		Lebih dari 2 bentang	$w_u l^2 / 10$

Negatif ^[1]	Muka dari pendukung lainnya	Semua	$w_u l^2 / 11$
	Muka semua pendukung memenuhi a dan b	a) Pelat dengan bentang tidak lebih dari 3m b) Balok dengan rasio jumlah kekakuan kolom terhadap kekakuan balok melebihi 8 pada setiap ujungnya	$w_u l^2 / 12$

[1] untuk menghitung momen negatif, l_n harus diambil rata-rata panjang bentang bersih bersebelahan

2.6. BALOK TERLENTUR

Semua benda yang dibebani akan menderita tegangan di dalamnya. Balok yang dibebani akan melengkung yang disebut melentur. Lenturan pada tumpuan sederhana digambarkan dengan bidang Momen seperti Gambar 2.1.

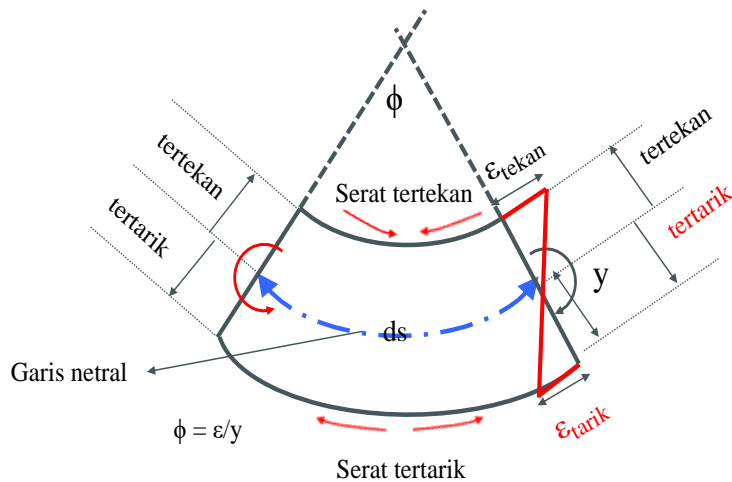


Gambar 2.1. Balok, kurvatur dan bidang momen

2.6.1. Kurvatur, Regangan Tekan, Regangan Tarik

Seperti sudah diutarakan, beton kuat menahan tekan dan lemah dalam menahan tarik. Untuk menahan tarik dipasang baja tulangan, dengan demikian bagian yang menahan tarik harus difahami. Letak daerah tekan dan tarik diketahui dari bentuk kelengkungan.

Bidang momen positif pada umumnya menggambarkan kelengkungan (kurvatur) ke bawah, sedangkan bidang momen negatif menggambarkan kelengkungan ke atas. Kelengkungan ini mempunyai sudut belahan ϕ (Gambar 2.2). Bentuk kelengkungan sepanjang ds (Gambar 2.1), dinyatakan pada Gambar 2.2. Bila beban bertambah maka momen juga bertambah dan menyebabkan peningkatan kelengkungan (Gambar 2.2).



Gambar 2.2. Kurvatur dan kondisi penampang beton

Balok yang melengkung menyebabkan perbedaan jenis penderitaan pada penampangnya. Kelengkungan ke bawah menyebabkan serat bagian atas tertekan dan serat bagian bawah tertarik (Gambar 2.2). Serat yang tertekan akan memendek sebesar $\Delta_{memendek}$ dan serat yang tertarik memanjang sebesar $\Delta_{memanjang}$. Rasio perubahan panjang terhadap panjang semula disebut regangan (Persamaan 2.1).

$$\epsilon_{tekan} = \frac{\Delta_{memendek}}{l} \quad (2.1a)$$

$$\epsilon_{tarik} = \frac{\Delta_{memanjang}}{l} \quad (2.1b)$$

Di daerah yang menderita momen positif, serat bagian bawah tertarik atau memanjang sebesar ϵ_{tarik} , sedang serat bagian atas tertekan atau memendek sebesar ϵ_{tekan} . Untuk daerah yang menderita momen negatif serat bagian atas tertarik atau memanjang sebesar ϵ_{tarik} , sedang serat bagian bawah tertekan atau ϵ_{tekan} (Gambar 2.3).

2.6.2. Penampang Efektif

Pemasangan baja tulangan harus di daerah tarik (tulangan tunggal), namun dapat pula dipasang di daerah tarik dan tekan (tulangan rangkap). Beton di daerah selimut tarik sampai titik berat tulangan tarik dianggap tidak efektif (Gambar 2.3). Jadi luas penampang beton efektif dalam menahan momen adalah (Persamaan 2.2):

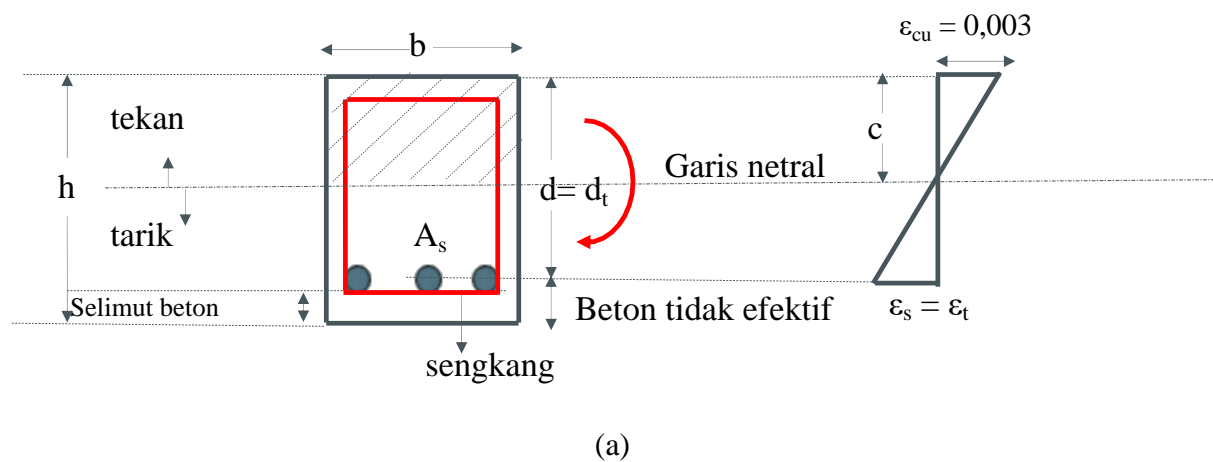
$$A_{ef} = b \cdot d \quad (2.2)$$

Dimana:

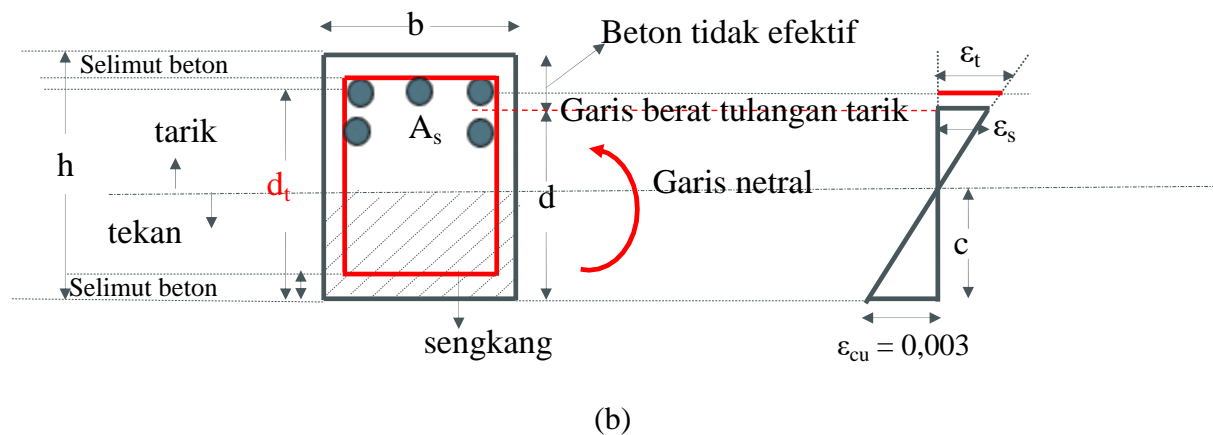
d : adalah tinggi efektif yaitu tinggi serat tekan terluar ke sumbu (titik berat) tulangan tarik (Gambar 2.3)

Regangan pada garis berat tulangan tarik disebut ϵ_s , sedangkan regangan pada tulangan tarik terluar adalah ϵ_t (Gambar 2.3a dan 2.3b). Bila tulangan tarik 1 baris, maka $\epsilon_s = \epsilon_t$ (Gambar 2.3a), bila lebih dari 1 baris, titik berat tulangan tarik harus dicari terlebih dahulu (Gambar 2.3b).

Momen Positif



Momen negatif



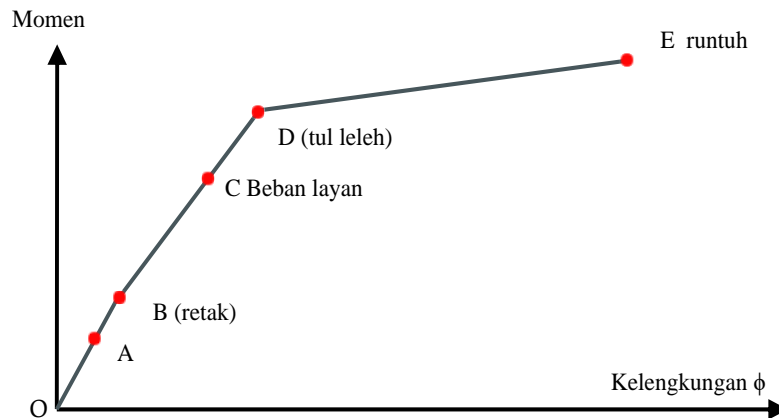
Gambar 2.3. Tinggi efektif: (a) Momen positif, (b) Momen negative

2.6.3. Momen - Kurvatur

Peningkatan momen menyebabkan sudut belahan atau kelengkungan ϕ bertambah besar. Hubungan momen – kurvatur sampai retak (B) berbentuk linier dengan sudut yang tajam. Pada tahap ini penampang masih utuh sehingga dapat diperhitungkan dengan memakai momen inersia I yang utuh (I_g). Setelah beton mencapai kekuatan tarik lenturnya (Pers. 1.1) terjadi retak (titik B pada Gambar 2.4). Retak ini membuat laju peningkatan momen berkurang tetapi laju pertambahan kelengkungan meningkat yang terlihat sebagai kelandaian sudut pada hubungan momen – kurvatur (Gambar 2.4). Retak ini mengakibatkan tinggi efektif berkurang, konsekuensinya momen inersia I menurun sehingga kekakuan penampang EI juga menurun.

Balok harus dapat menahan beban layan meski batas kekuatan tarik beton terlampaui. Berarti beton telah retak. Besar beban yang dilayani ditentukan dengan keadaan batas layan. Keadaan batas layan adalah keadaan yang disyaratkan dalam perencanaan dengan melakukan pembatasan pada tegangan, deformasi atau daktilitas, dan lebar retak pada kondisi pembebanan layan. Hal tersebut dilakukan agar balok mempunyai kinerja yang baik selama umur rencana. Batas layan dinyatakan dengan titik C (Gambar 2.4). Setelah retak gaya tarik ditransfer ke baja tulangan.

Apabila beban ditingkatkan lagi, maka baja meleleh (ϵ_y), yang dinyatakan dengan titik D. Setelah leleh kurvatur meningkat dengan cepat (Gambar 2.4).



Gambar 2.4. Momen-kurvatur

Kemampuan berdeformasi atau melengkung menentukan tipe kehancuran beton. Tipe kehancuran tulangan tarik atau terkontrol tarik membuat balok sangat mampu berdeformasi sebelum runtuh, sedangkan kehancuran tekan atau terkontrol tekan dan berimbang membuat balok runtuh secara tiba-tiba yang disebut kehancuran getas atau *brittle* (Gambar 2.5).



Gambar 2.5. Momen-kurvatur, tipe kehancuran dan kemampuan berdeformasi

2.6.4. Daktilitas

Kemampuan berdeformasi dikenal sebagai daktilitas. Daktilitas (μ) adalah rasio deformasi terhadap deformasi leleh (Persamaan 2.3).

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_y} \quad (2.3)$$

Tipe kehancuran balok berhubungan dengan regangan pada tulangan tarik terluar atau pada lapis terjauh dari serat tekan ekstrim yang disebut regangan t (ϵ_t). Lapis terjauh dari serat tekan ekstrim disebut d_t (Gambar 2.8). Regangan tarik netto pada lapis ekstrim ϵ_t , dapat juga dinyatakan dalam c/d_t (Persamaan 2.4). Dimana c adalah jarak dari serat tekan terluar ke garis netral (Gambar 2.3)

$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \epsilon_{cu} \quad (2.4)$$

Nilai regangan tarik baja terluar (ϵ_t) tersebut berdasarkan serat beton tekan mencapai regangan tekan maksimum (ϵ_{cu}) yaitu 0,003 (Gambar 1.8), sehingga Persamaan 2.4 menjadi Persamaan 2.5.

$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} 0,003 \quad (2.5a)$$

$$c = \frac{0,003}{0,003 + \epsilon_s} d \quad (2.5b)$$

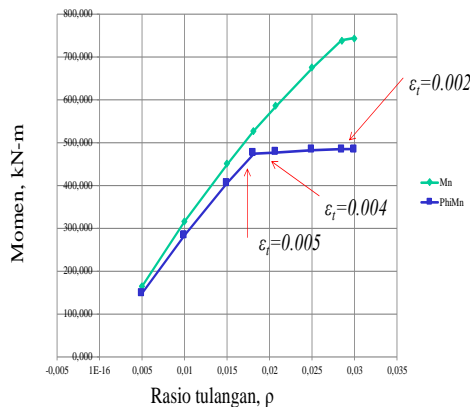
Besar ϵ_t dipengaruhi oleh dimensi penampang balok, f_c' , f_y , letak dan jumlah tulangan tarik. Rasio jumlah tulangan tarik terhadap luas efektif beton dikenal dengan ρ (Persamaan 2.6).

$$\rho = \frac{A_s}{A_{ef}} \quad (2.6)$$

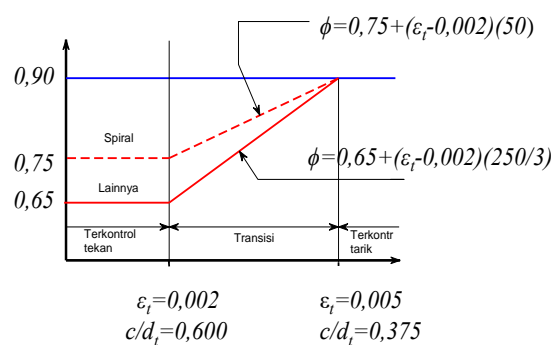
Peningkatan tulangan tarik atau peningkatan ρ sampai batas tertentu tidak menunjukkan peningkatan dalam menahan momen. Pada ϵ_t 0,005; 0,004; 0,002 phi momen nominal tidak meningkat lagi meskipun tulangan ditambah (Gambar 2.6).

ϵ_t 0,002-0,005 berarti balok tersebut ada dalam keadaan transisi dari terkontrol tekan ke terkontrol tarik (Gambar 2.7). Nilai ϵ_t 0,002 mendekati nilai 0,0021 yang merupakan regangan leleh (ϵ_y) untuk f_y 420 MPa. Regangan 0,002 adalah juga regangan permanen (Gambar 1.9).

Bila daktilitas diambil 2, maka dari Persamaan 2.3 diperoleh nilai $\epsilon_t = 0,004$. Nilai ini dianggap sebagai batas daktilitas. Bila $\epsilon_t = 0,005$ maka daktilitas lebih dari 2.



Gambar 2.6. Hubungan momen dan ρ



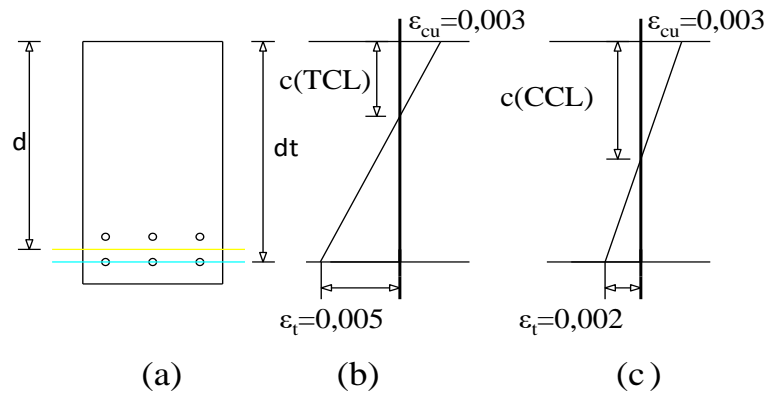
Gambar 2.7. Faktor reduksi dan ϵ_t Pasal 22.2.2 SNI 2847-2019 [15]

Besar ϵ_t menentukan jenis balok pada kondisi terkontrol tekan, terkontrol tarik, atau transisi dan menentukan besar faktor reduksi ϕ sebagai keamanan (Gambar 2.7).

Suatu penampang terkontrol tarik (TCL: *tension control limit*) bila memiliki luas tulangan tarik di sisi terluar sedemikian rupa sehingga pada saat mencapai kekuatan lentur nominalnya, regangan tarik netto baja tertarik pada lapis ekstrim $\epsilon_t > 0,005$. Kehancuran pada TCL ditandai dengan keretakan atau defleksi yang berlebihan pada komponen struktur sehingga dapat segera diatasi. Penampang terkontrol tekan (CCL: *compression control limit*) bila memiliki luas

tulangan tarik di sisi terluar sedemikian rupa sehingga pada saat mencapai kekuatan lentur nominalnya, regangan tarik netto baja tertarik pada lapis ekstim $\epsilon_t \leq 0,002$ (Gambar 2.7).

Letak garis netral pada TCL lebih pendek dibandingkan CCL (Gambar 2.8).



(a) Gambar 2.8. Batas terkendali tarik (TCL) dan batas terkendali tekan (CCL),
 (a) penampang balok, (b) distribusi regangan pada batas terkendali tarik,
 (c) distribusi regangan pada batas terkendali tekan

Semakin besar ϵ_t , daktilitas elemen struktur semakin besar (Pers. 2.3). Daktilitas elemen struktur akan meningkat bila dipakai tulangan spiral bila $\epsilon_t < 0,005$ (Gambar 2.7). Daktilitas elemen struktur balok akan mempengaruhi daktilitas bangunan keseluruhan. Besar daktilitas bangunan ditentukan oleh kebutuhan dalam mengamankan bangunan terutama terhadap gempa.

2.6.5. Keamanan Desain dan Kekuatan Balok Beton Bertulang

2.6.5.1. Keamanan Desain

Dalam mendesain balok, diperlukan keamanan karena adanya keterbatasan dan ketidakpastian. Tingkat keamanan ditentukan oleh berbagai kombinasi faktor beban, interaksi antara pengaruh beban, faktor kesalahan manusia dan ketidakpastian lain. Keamanan dimasukkan dalam berbagai parameter antara lain dengan:

Beban:

- Kuat perlu (Tabel 2.1)

Material:

- Untuk mutu beton: dipakai faktor 0,85 (Bab 1.2.1)
- Untuk baja: dipakai f_y dengan nilai 60-70% regangan putus (Bab 1.3).

Pemahaman mekanisme dalam menahan:

- Momen
- Geser
- Torsi
- Momen dan aksial (pada kolom)
- Momen 2 arah (pelat)

Faktor reduksi kekuatan dipergunakan antara lain untuk mengamankan keterbatasan pemahaman pada gaya-gaya dalam tersebut.

2.6.5.2. Faktor Reduksi Momen, Gaya Aksial, Kombinasi Momen dan Gaya Aksial

Tujuan penggunaan faktor reduksi kekuatan selain untuk mengamankan keterbatasan pemahaman pada gaya-gaya dalam adalah juga untuk memperhitungkan kemungkinan terjadinya penurunan kekuatan akibat variasi yang terdapat pada kekuatan material, dimensi pada saat pelaksanaan, pengaruh penyederhanaan, asumsi di dalam persamaan desain, tingkat daktilitas, potensi mode kegagalan dari komponen, kebutuhan keandalan, signifikansi kegagalan, ketersediaan lintasan beban alternatif pada komponen di dalam struktur dan cuaca.

Nilai faktor reduksi ϕ tergantung pada ϵ_t dan jenis sengkang yang berarti tergantung tipe kehancuran balok. Pada elemen struktur terkontrol tekan faktor reduksi ϕ 0,65 untuk sengkang dan 0,75 untuk spiral. Nilai faktor reduksi ϕ pada kondisi terkontrol tarik adalah 0,9. Dengan demikian kekuatan nominal pada terkontrol tekan lebih kecil dibanding terkontrol tarik (Gambar 2.7).

Pada daerah transisi terjadi peningkatan faktor reduksi ϕ meningkat secara linier (Gambar 2.7).

$$1 \text{ Spiral: } \phi = 0,75 + (\epsilon_t - 0,002) (50) \quad (2.7.a)$$

$$= 0,75 + 0,15 [(1/(c/d_t) - (5/3))] \quad (2.7.b)$$

$$2 \text{ Lainnya } \phi = 0,65 + (\epsilon_t - 0,002) (250/3) \quad (2.7.c)$$

$$= 0,65 + 0,25 [(1/(c/d_t) - (5/3))] \quad (2.7.d)$$

Nilai ϕ dapat diambil dari Tabel 21.2.2 SNI atau Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial.

Regangan tarik netto ϵ_t	Klasifikasi	ϕ			
		Jenis tulangan transversal			
		Spiral sesuai 25.7.3		Tulangan lainnya	
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Terkontrol tekan	0,75	a)	0,65	b)
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,005$	Transisi ^[1]	$0,75 + 0,15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	c)	$0,65 + 0,25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	d)
$\epsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,9	e)	0,90	f)

[1] Untuk penampang transisi, diperbolehkan memakai nilai faktor kekuatan sama dengan penampang terkontrol tekan

2.6.5.3. Faktor Reduksi pada Elemen yang Menderita Momen, Geser, Torsi dan Kombinasinya

Faktor reduksi pada elemen yang menderita momen, geser, torsi dan kombinasinya dapat dilihat pada Tabel 21.2.1 SNI atau Tabel 2.4. Kombinasi beban tersebut pada umumnya terjadi di balok.

Tabel 2.4. Faktor reduksi kekuatan ϕ untuk momen, aksial, geser, torsi dan kombinasinya

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
a)	Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65-0,9 sesuai Gambar 2.2	Di ujung komponen pratarik (<i>pretension</i>) dimana <i>strand</i> belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan Pasal 21.2.3
b)	Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa pada Pasal 21.2.4
c)	Torsi	0,75	-
d)	Tumpu (<i>bearing</i>)	0,65	-

2.6.5.4. Kekuatan Balok Beton Bertulang

Kekuatan suatu bangunan, komponen atau penampang dihitung menggunakan asumsi dasar dan persamaan kekuatan, dengan nilai nominal dari kekuatan material, dan dimensinya, disebut sebagai kekuatan nominal atau S_n . Sedang kekuatan desain atau kekuatan yang dapat digunakan dari suatu komponen atau penampang adalah kekuatan nominal S_n yang direduksi dengan faktor reduksi kekuatan ϕ (R4.6). Demikian juga kekuatan desain dari komponen, *joint*, dan sambungannya (*connections*), dalam hal momen, gaya aksial, gaya geser, gaya torsi, dan gaya tumpu (*bearing*) dipakai kekuatan nominal S_n yang direduksi dengan faktor reduksi kekuatan ϕ . S_n yang sudah direduksi ini minimal sama dengan kuat perlu. Hal ini berarti dalam perencanaan bangunan dan komponen struktur harus memiliki kekuatan rencana di sepanjang komponen ϕS_n , yang lebih besar atau sama dengan kekuatan perlu U (Pasal 4.6.2) yang dinyatakan dengan Persamaan 2.8.

kekuatan desain \geq kekuatan perlu

$$\phi S_n \geq U \quad (2.8)$$

Untuk balok pada umumnya berpedoman pada Persamaan 2.8.a hingga 2.8.c (Pasal 10.5.1.1).

$$a) \phi M_n \geq M_u \quad (2.8.a)$$

$$b) \phi V_n \geq V_u \quad (2.8.b)$$

$$c) \phi T_n \geq T_u \quad (2.8.c)$$

$$d) \phi P_n \geq P_u \quad (2.8.d)$$

Kekuatan perlu U yang diperoleh dari beban terfaktor dan gaya-gaya di dalam kombinasi pembebanan yang dipersyaratkan di dalam standar ini (Tabel 2.1) atau peraturan umum gedung

lainnya (Pasal 4.6.2). Untuk setiap kombinasi beban terfaktor yang dipakai, kekuatan desain di semua penampang harus memenuhi Pasal 10.5.1.1 atau Persamaan 2.8.a s.d 2.8.d.

2.7. TEGANGAN LENTUR DAN RETAK LENTUR

2.7.1. Tegangan Lentur Sebelum Retak

Balok yang dibebani akan melentur. Pada penampang balok akan terjadi tegangan lentur. Pada penampang terjadi dua jenis tegangan yaitu tegangan tekan dan tegangan tarik, yang posisi dan besarnya tergantung pada momen yang harus ditahan. Karena terdapat dua jenis tegangan, maka garis peralihan kedua jenis tegangan disebut garis netral. Tegangan lentur pada umumnya dinyatakan dengan:

$$\sigma_{\text{lentur}} = \frac{M}{W} \quad (2.9)$$

W adalah momen tahanan, yang dirumuskan dengan:

$$W = \frac{I}{y} \quad (2.10)$$

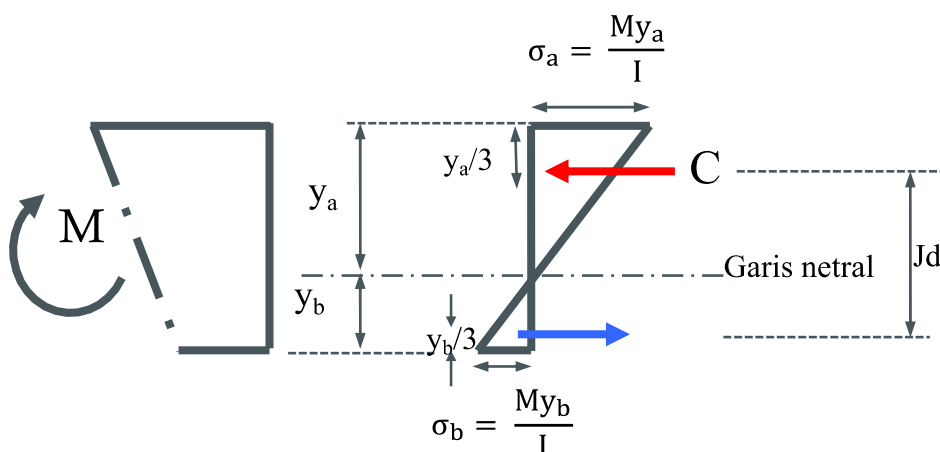
y adalah jarak serat yang ditinjau ke garis netral

Tegangan lentur bagian atas dan bawah

$$\sigma_a = \frac{My_a}{I} \quad (2.11.a)$$

$$\sigma_b = \frac{My_b}{I} \quad (2.11.b)$$

Tegangan lentur penampang pada umumnya dinyatakan seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Diagram tegangan lentur pada umumnya

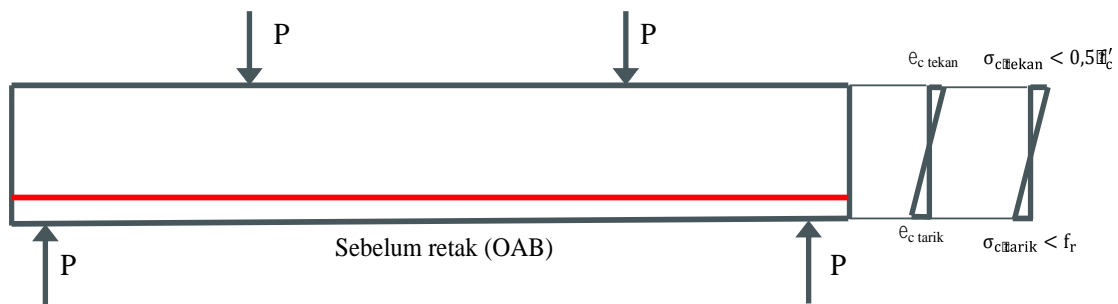
Persamaan 2.9, 2.11.a, 2.11.b dan Gambar 2.9 tidak digunakan untuk beton karena:

1. Hubungan tegangan dan regangan beton tidak linier untuk tegangan lebih dari $0,5 f_c'$

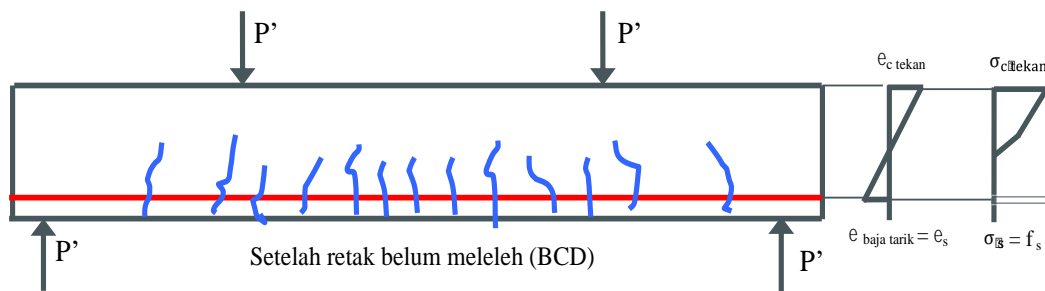
2. Terdapat tulangan yang mentransfer tegangan tarik pada saat terjadi retak

2.7.2. Retak Lentur

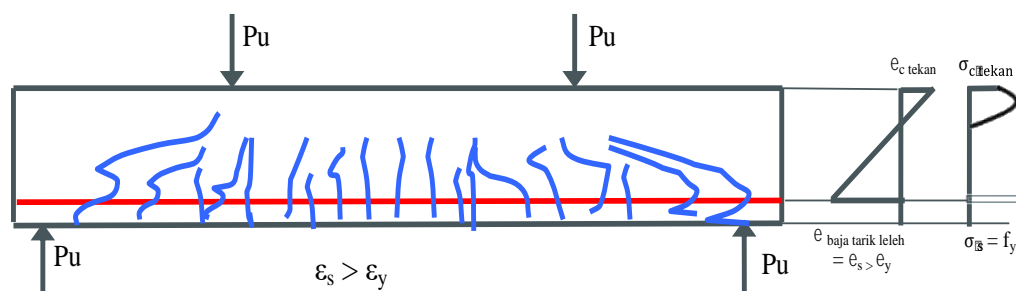
Diagram tegangan dan regangan yang terjadi pada balok dengan peningkatan beban, diilustrasikan pada Gambar 2.10. Pada beban kecil penampang belum retak, momen masih di wilayah OAB pada Gambar 2.4. Tegangan beton yang timbul pada wilayah ini $< 0,5 f_c'$ dan beton masih mampu menahan tegangan tarik, sehingga diagram tegangan berbentuk linier, dengan demikian Persamaan 2.11.a dan 2.11.b masih sesuai (Gambar 2.10.a).



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.10. Kondisi balok, regangan dan tegangan penampang beton:
(a) Sebelum retak, (b) Tegangan tarik sudah ditransfer ke baja,
(c) Tulangan baja tarik sudah meleleh

Pada saat ikatan dalam beton mulai putus karena peningkatan beban. tegangan tarik ditransfer ke baja tulangan. Diagram tegangan yang semula berbentuk linier berubah menjadi parabola. Beton di daerah tarik dianggap tidak memberikan kontribusi (Gambar 2.10.b,c). Bila beban meningkat lagi, timbul retak yang biasanya diawali di daerah momen maximum. Pada balok dengan tumpuan sederhana retak awal biasanya terjadi di tengah bentang, di serat tarik terluar. Bila beban terus meningkat, retak lentur tumbuh semakin panjang dan banyak dan dapat terjadi kegagalan.

2.7.3. Tegangan dan Regangan Lentur Balok Beton Bertulang

2.7.3.1. Distribusi Regangan

Distribusi regangan dianggap linier, dengan serat tekan terluar adalah $\epsilon_{\text{batas beton}} = \epsilon_{\text{cu}} = 0,003$ (Gambar 1.8, Gambar 2.10 dan Persamaan 2.5).

2.7.3.2. Distribusi Tegangan

Tegangan tekan setelah tegangan tekan beton $> 0,5 f_c'$ terdistribusi sepanjang daerah tekan dengan bentuk parabola karena beberapa ikatan beton putus dan gaya tarik mulai ditransfer ke baja tulangan. Hal ini disebut distribusi tegangan aktual (Gambar 2.11). Gaya tekan C atau *compression* dinyatakan dengan Persamaan 2.12

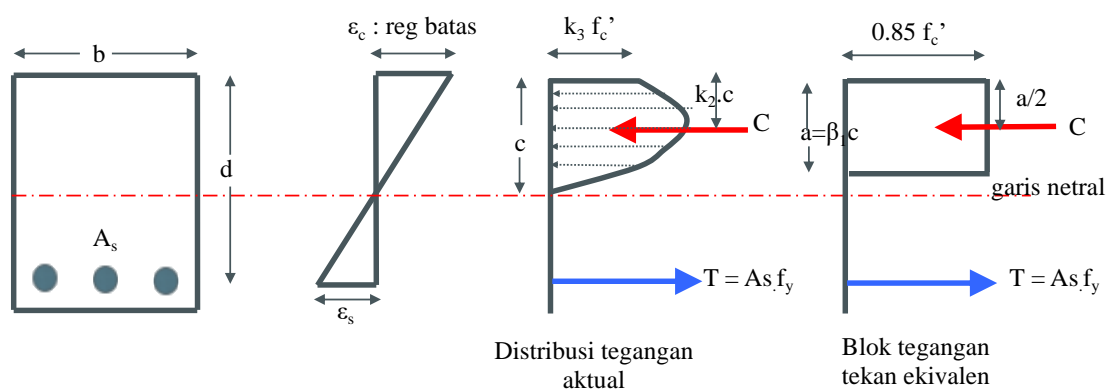
$$C = k_2 \cdot k_3 \cdot f_c' \cdot b \quad (2.12)$$

Dimana

k_3 adalah faktor pengali terhadap f_c'

k_2 adalah faktor pengali terhadap jarak ke garis netral c

Luas tekan pada distribusi tegangan aktual yang berbentuk parabol cukup rumit dihitung. Whitney, menyederhanakannya dengan bentuk empat persegi panjang seperti Gambar 2.11. Untuk mengakomodasi adanya kemungkinan perbedaan kuat tekan beton di laboratorium dan lapangan, maka kuat tekan beton dianggap $0,85 f_c'$.



Gambar 2.11. Distribusi tegangan lentur aktual dan penyederhanaannya

Pasal 22.2.2.4.1 tegangan beton $0,85 f_c'$ diasumsikan terdistribusi rata terhadap zona tekan ekuivalen yang dibatasi serat tekan terluar dan garis yang paralel terhadap sumbu netral, yang terletak pada jarak "a" dari serat tekan terjauh seperti Persamaan 2.13.

$$a = \beta_1 c \quad (2.13)$$

Nilai β_1 dinyatakan dengan Tabel 22.2.2.4.3 SNI atau Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Nilai β_1 untuk distribusi tegangan beton persegi ekuivalen

f'_c , MPa	β_1	
$17 \leq f'_c \leq 28$	0,85	a)
$28 < f'_c < 55$	$0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7}$	b)
$f'_c \geq 55$	0,65	c)

Diagram pada Gambar 2.11 terjadi selebar balok b . Dengan mempergunakan blok tegangan tekan ekivalen, gaya tekan C dinyatakan pada Persamaan 2.14.

$$C = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.14)$$

Gaya tekan ini harus diimbangi oleh gaya tarik yang dihasilkan oleh tulangan tarik A_s (Persamaan 2.15)

$$T = A_s \cdot f_s \quad (2.15.a)$$

Agar balok bersifat duktail, maka tulangan tarik didesain meleleh, sehingga

$$T = A_s \cdot f_y \quad (2.15.b)$$

2.7.3.3. Kondisi Berimbang

Keruntuhan kondisi berimbang tergolong getas (Gambar 3.6). Rasio jumlah tulangan tarik A_s dan luas tulangan beton efektif ρ (Persamaan 2.6) menjadi suatu parameter mengenal jenis keruntuhan. Persamaan 2.6 ditulis Kembali dengan bentuk seperti Persamaan 2.16.a.

$$\rho = \frac{A_s}{b d} \quad (2.16.a)$$

ρ kondisi berimbang:

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{b d} \quad (2.16.b)$$

Keseimbangan:

$$C_b = T_b \quad (2.17)$$

$$0,85 f'_c a_b b = A_{sb} f_y \quad (2.17.a)$$

$$0,85 f'_c a_b b = \frac{A_{sb}}{b d} b d f_y$$

$$0,85 f'_c a_b = \rho_b d f_y$$

$$0,85 f'_c \beta_1 c_b = \rho_b d f_y$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \frac{c_b}{d}$$

Berdasar Gambar 2.11, dan kompatibilitas regangan maka:

$$c_b = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} d$$

$$\frac{c_b}{d} = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right)$$

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) \quad (2.18)$$

Jika kita substitusikan $\epsilon_{cu} = 0,003$ dan $E_s = 200000$ MPa, kita dapatkan

$$\rho_b = \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.18.a)$$

2.8. JENIS KERUNTUHAN

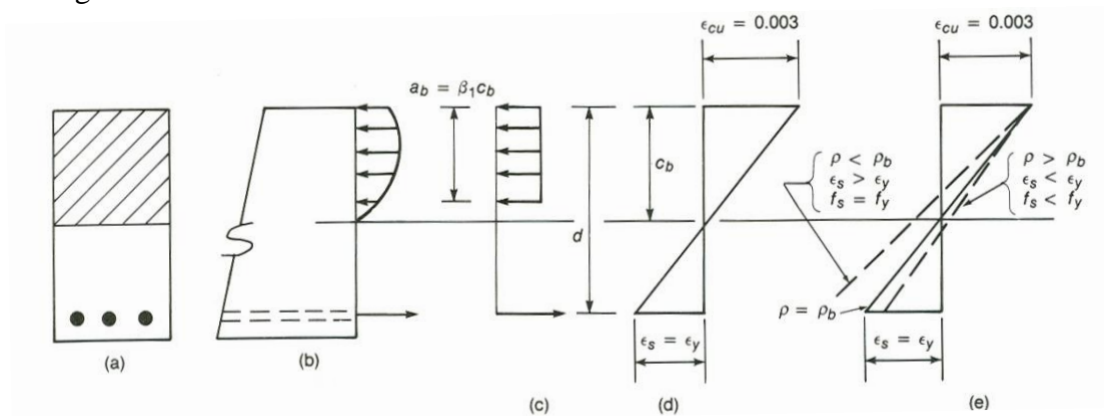
Kehancuran berimbang adalah tipe kehancuran dimana baja meleleh bersamaan waktunya dengan beton hancur (Gambar 2.12.d), dimana ρ_b dinyatakan dengan Persamaan 2.18.

Untuk menjamin keselamatan manusia, maka balok atau bangunan harus didesain tidak runtuh secara tiba-tiba, jadi keruntuhan harus bersifat daktil (ulet). Keruntuhan ini disebut keruntuhan tarik. SNI 2019 menyebutnya sebagai terkontrol tarik. Bila balok sudah tidak kuat, maka diharapkan memberi pertanda dengan bentuk melengkung atau retak. Bentuk ini akan tercapai bila baja tulangan leleh sebelum beton hancur. Perencanaan seperti ini juga dikenal sebagai *under reinforced* ($\rho < \rho_b$). Berbeda dengan keruntuhan tarik, keruntuhan getas atau dalam wilayah terkontrol tekan, keruntuhan terjadi tiba-tiba karena beton hancur sebelum baja meleleh. Perencanaan seperti ini dikenal sebagai *over reinforced* ($\rho > \rho_b$) (Gambar 2.12.e).

Model keruntuhan dapat dirangkum adalah sebagai berikut:

1. Keruntuhan berimbang bersifat getas atau *brittle*, ρ_b
2. Keruntuhan terkontrol tarik bersifat ulet atau *ductile*: $\epsilon_t \geq 0,005$ (Gambar 2.7), balok *under-reinforced*, $\rho < \rho_b$
3. Keruntuhan terkontrol tekan: $\epsilon_t \leq \epsilon_y$, *over-reinforced* bersifat getas atau *brittle*
4. Keruntuhan transisi: $\epsilon_y < \epsilon_t < 0,005$

Agar keruntuhan bersifat duktail jumlah tulangan harus lebih kecil dari tulangan kondisi berimbang.



Gambar 2.12. Tipe kehancuran: (a) Penampang, (b) Tegangan, (c) Tegangan berimbang Whitney, (d) regangan berimbang, (e) kehancuran tarik ($\rho < \rho_b$), kehancuran tekan ($\rho > \rho_b$) dan kehancuran berimbang ($\rho = \rho_b$)

2.9. TULANGAN MAXIMUM

Agar baja meleleh terlebih dahulu maka rasio luas baja tulangan longitudinal terhadap luas efektif dibatasi sebagai tulangan maximum (ρ_{maximum}).

2.9.1. Batas Atas Tulangan Balok Beton pada Batas Duktilitas

Batas duktilitas 2 mempunyai $\epsilon_t = 0,004$ (2.6.4), dengan demikian batas atas tulangnya adalah $\rho_{0,004}$ (Persamaan 2.19)

$$\rho_{0,004} = \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 0,004} \right)$$

$$\rho_{0,004} = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 0,004} \right) \quad (2.19)$$

2.9.2. Batas Atas Tulangan Balok Beton pada $\epsilon_t \geq 0,005$ atau $\phi = 0,90$ atau Keruntuhan Terkontrol Tarik.

Batas regangan dimana momen tidak meningkat meskipun tulangan ditambahkan adalah $\epsilon_t = 0,005$ (Gambar 2.6). Analog dengan batas atas tulangan balok beton pada batas duktilitas, maka batas atas tulangan balok beton pada $\epsilon_t \geq 0,005$ atau $\phi = 0,9$ adalah $\rho_{0,005}$ (Pers. 2.20).

$$\rho_{\text{max}0,005} = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \beta_1 \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 0,005} \right) \quad (2.20)$$

2.9.3. Batas Atas Tulangan Longitudinal Atas dan Bawah

Pada sebarang penampang, jumlah tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari yang disyaratkan Pasal 9.6.1.2, dan rasio tulangan ρ tidak boleh melebihi 0,025, baik untuk tulangan atas maupun bawah (Pasal 18.6.3.1).

$$\rho_{\max \text{ longitudinal}} = \rho_{\max \text{ atas maupun bawah}} = \rho_{\max} = 0,025 \quad (2.21a)$$

Tumilar, 2019 [16] menyatakan A^- or $A^+ \leq 0,025$
dan untuk tulangan tarik

$$\rho_{\max} = 0,75 \rho_b \quad (2.21b)$$

2.10. TULANGAN MINIMUM

Bila hubungan $M-\phi$ di daerah OB atau sebelum B (Gambar 2.4) berarti beton sendiri mampu menahan beban. Tulangan tidak diperlukan pada daerah ini, namun bila terjadi ketidak cermatan dalam perencanaan atau pelaksanaan, dapat terjadi keruntuhan tekan; oleh sebab itu untuk menjamin kehancuran bersifat daktil, diharuskan memasang tulangan minimum. Pasal 9.6.1.1 menyatakan luas minimum tulangan lentur $A_{s,\min}$, harus disediakan pada tiap penampang dimana tulangan tarik dibutuhkan sesuai analisis (Pasal 9.6.1.1). Ketentuan ini dimaksudkan untuk menghasilkan kekuatan lentur melebihi kekuatan retak dengan cukup besar. Tujuannya adalah untuk menghasilkan sebuah balok yang mampu bertahan setelah terjadinya retak lentur, dengan retak dan lendutan yang terlihat dengan demikian memperingatkan siapapun agar segera dilakukan tindakan pencegahan. Pasal 9.6.1.2 menyatakan bahwa $A_{s,\min}$ harus lebih besar dari a) dan b)

$$a) \quad A_{s \min} = 0,25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d; \quad \text{jadi} \quad \rho_{\min} = \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \quad (2.22.a)$$

$$b) \quad A_{s \min} = \frac{1,4}{f_y} b_w d; \quad \text{jadi} \quad \rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.22.b)$$

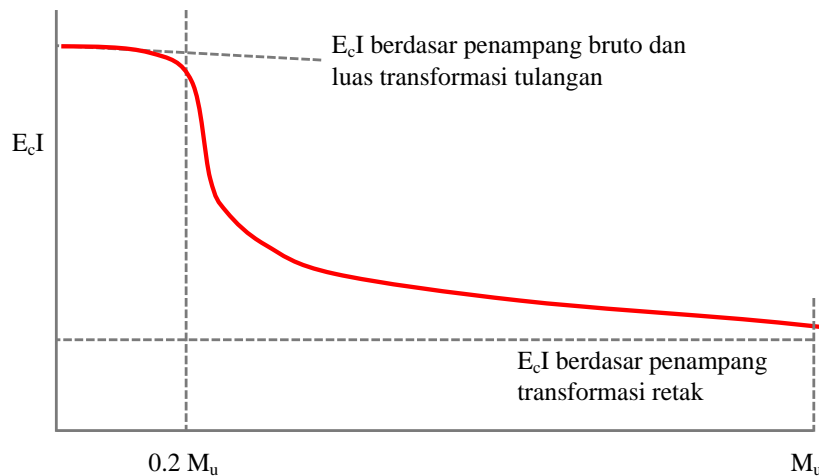
Untuk balok statis tertentu dengan sayap dalam keadaan tarik, nilai b_w harus lebih kecil dari b_f dan $2b_w$.

2.11. LENDUTAN

2.11.1. Momen Inersia Efektif

Karena berat sendiri apalagi bila ditambah beban, balok mengalami penurunan. Penurunan balok sering disebut lendutan. Besar lendutan dipengaruhi oleh kekakuan EI. E adalah modulus elastisitas yang tergantung pada jenis material, dan momen inersia I yang dipengaruhi oleh dimensi dan posisi penampang. Lendutan membuat satu sisi serat tertarik; padahal kekuatan beton dalam menahan tarik $\pm 10\% f'_c$ (Gambar 1.7), yang diperkirakan terjadi pada momen kurang dari 0,2 M_u (Gambar 2.13). Pada kisaran nilai tersebut retak pada daerah tarik terjadi

mengakibatkan momen inersia I turun seperti Gambar 2.13. Karena hal ini maka dalam perhitungan momen inersia bruto atau gross I_g tidak tepat lagi digunakan (Gambar 2.13).



Gambar 2.13. Perubahan kekakuan

Untuk pelat satu arah dan balok prismatis, Momen Inersia yang dipakai adalah momen inersia efektif I_e . I_e dapat diambil dari Persamaan 2.23 di tengah bentang sederhana dan menerus, dan di daerah tumpuan untuk balok kantilever (Pasal 24.2.3.7).

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (2.23)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (2.23.a)$$

M_a : momen maksimum dalam komponen struktur akibat beban layan pada tahap defleksi dihitung

f_r : Persamaan 1.1

2.11.2. Lendutan Seketika

Lendutan seketika adalah lendutan elastis akibat beban ketika pertama kali diberikan (R 24.2.4.1). Lendutan ini harus dihitung dengan metode dan formula untuk lendutan elastis, dengan mempertimbangkan pengaruh retak, dan tulangan yang mempengaruhi kekakuan penampang (Pasal 24.2.3.1). Besar lendutan dapat dihitung dengan menganggap beban adalah bidang momen $\omega/(EI)$. Lendutan ini harus dihitung tersendiri karena lendutan jangka panjang pengaruh susut suhu merupakan fungsi dari lendutan seketika.

2.11.3. Lendutan Jangka Panjang

Lendutan atau penurunan ini dipengaruhi suhu, kelembaban, kondisi perawatan (*curing*), umur pada waktu pembebanan, kuantitas tulangan tekan dan besar beban tetap.

Pengaruh tersebut dihitung dengan mengalikan lendutan seketika dengan faktor pengali λ_Δ (Pasal 24.2.4.1.1) sebesar:

$$\lambda_\Delta = \frac{\xi}{1+50\rho'} \quad (2.24)$$

Dimana:

λ_{Δ} : faktor pengali terhadap lendutan akibat beban tetap karena pengaruh susut suhu

ξ : faktor pengaruh waktu

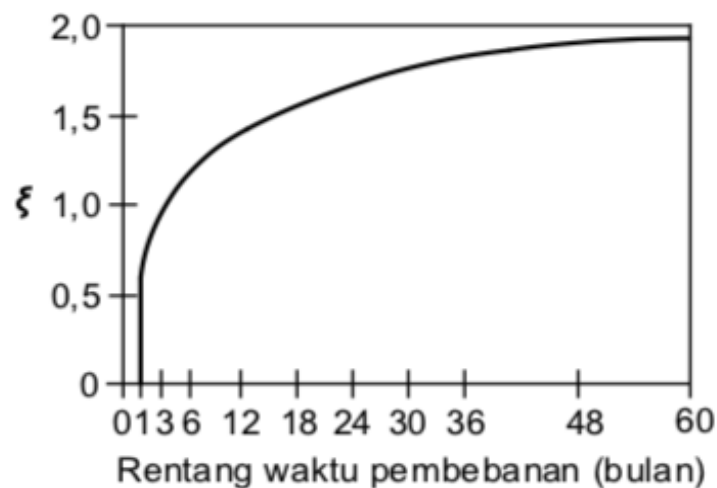
ρ' : rasio luas tulangan tekan terhadap luas penampang efektif beton

Besarnya ξ dinyatakan pada Tabel 24.2.4.1.3 SNI 2847-2019 atau Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Faktor pengaruh waktu terhadap beban tetap

Durasi beban tetap, bulan	Faktor pengaruh waktu (ξ)
3	1
6	1,2
12	1,4
60 atau lebih	2

Besar faktor pengaruh waktu dapat juga diambil dari Gambar R 24.2.4.1 SNI atau Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Faktor pengali untuk lendutan jangka panjang

Lendutan jangka panjang tersebut tidak boleh lebih dari Tabel 2.7 (Tabel 24.2.2 SNI).

Tabel 2.7. Batas lendutan

Jenis komponen struktur	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat L dan R maksimum	1/180 ^[1]
Lantai		Lendutan seketika akibat L	1/360 ^[2]
	Mungkin akan rusak akibat	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah	

Atap atau lantai	Memikul atau disatukan dengan elemen-elemen non struktural	lendutan yang besar	pemasangan elemen non struktural yaitu jumlah dari lendutan jangka Panjang akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup ^[2]	1/480 ^[3]
		Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar		1/240 ^[4]

[[1] Batasan tidak dimaksudkan sebagai pengaman terhadap genangan air. Genangan air harus diperiksa berdasarkan perhitungan lendutan, termasuk lendutan tambahan akibat genangan air dan mempertimbangkan pengaruh jangka panjang terhadap beban tetap lawan lendut, toleransi konstruksi dan keandalan sistem drainase.

[2] Lendutan jangka panjang harus dihitung berdasarkan Pasal 24.2.4, tapi boleh dikurangi dengan nilai lendutan yang terjadi sebelum pemasangan elemen nonstruktural. Besarnya lendutan ini harus dihitung berdasarkan data teknis yang dapat diterima terkait dengan karakteristik hubungan waktu-lendutan dari komponen struktur yang serupa dengan komponen struktur yang ditinjau.

[3] Batasan boleh dilampaui bila langkah pencegahan kerusakan terhadap komponen yang ditumpu atau disatukan telah dilakukan

[4] Batasan tidak boleh melebihi batasan toleransi yang disediakan untuk elemen nonstruktural

2.11.4. Tinggi Minimum

Untuk balok nonprategang yang tidak bertumpu atau melekat pada partisi atau konstruksi lain yang mungkin rusak akibat lendutan besar, ketebalan keseluruhan pelat h tidak boleh kurang dari batas minimum pada Tabel 9.3.1.1 (SNI) [15] atau Tabel 2.8., kecuali jika hasil hitungan pada batas lendutan Pasal 9.3.2 yang menunjuk Pasal 24.2.2. terpenuhi.

Tabel 2.8. Tinggi minimum balok nonprategang

Kondisi perlekatan	Minimum h ^[1]
Perlekatan sederhana	$L/16$
Menerus satu sisi	$L/18,5$
Menerus dua sisi	$L/21$
Kantilever	$L/8$

^[1] Rumusan dapat diaplikasikan untuk beton mutu normal dan tulangan mutu 420. Untuk kasus lain, minimum h harus dimodifikasi sesuai dengan Pasal 9.3.1.1.1. yaitu untuk f_y lebih dari 420 MPa, persamaan pada Tabel 9.3.1.1 harus dikalikan dengan $(0,4 + f_y / 700)$.

2.12. DETAIL PENULANGAN

Diagram momen yang biasanya digunakan dalam desain adalah pendekatan, beberapa pergeseran lokasi momen maksimum dapat terjadi karena perubahan pembebanan, penurunan tumpuan, beban lateral, atau penyebab lainnya. Retak tarik diagonal dalam komponen lentur tanpa sengkang dapat menggeser lokasi tegangan tarik yang dihitung sekitar jarak d menuju titik momen nol. Jika sengkang disediakan, pengaruh ini berkurang, meskipun masih ada sampai batas tertentu (R9.7.3.3). Karena hal tersebut maka tulangan perlu diperpanjang yang disebut "Panjang Penyaluran".

2.12.1. Umum

2.12.1.1. *Balok Menerus*

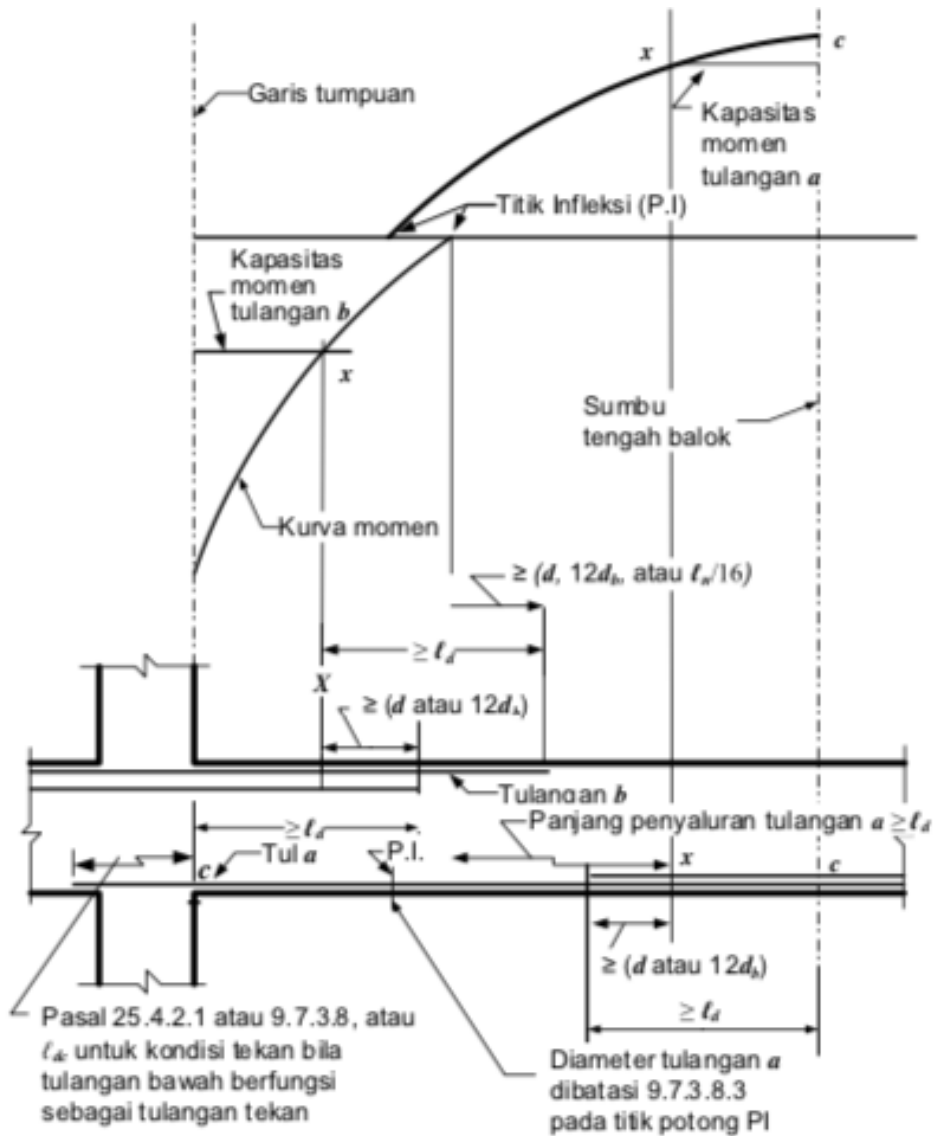
Penampang kritis untuk balok menerus yang tipikal diindikasikan dengan huruf “c” untuk titik dengan tegangan maksimum atau huruf “x” untuk titik dimana bengkokan atau pemutusan tulangan tarik tidak lagi diperlukan untuk menahan lentur (Gambar 2.15).

Tulangan harus diteruskan melewati titik dimana tulangan tersebut tidak lagi diperlukan untuk menahan lentur dengan jarak setidaknya yang terbesar dari d dan $12d_b$, kecuali pada tumpuan sederhana dan kantilever (Pasal 9.7.3.3).

Tulangan tarik lentur **tidak boleh dihentikan pada area tarik** kecuali a), b), atau c) terpenuhi (Pasal 9.7.3.5):

- a) $V_u \leq (2/3) \phi V_n$ pada titik putus (*cut off*)
- b) Untuk tulangan D36 atau yang lebih kecil, luas tulangan yang diteruskan dua kali lipat dari luas yang dibutuhkan untuk lentur pada titik putus dan $V_u \leq (3/4) \phi V_n$.
- c) Luas sengkang berlebih yang diperlukan untuk geser disediakan di sepanjang pemutusan tulangan atau kawat sejarak $3/4d$ dari titik pemutusan tulangan. Luas sengkang berlebih harus tidak boleh kurang dari $0,41b_w s / f_{yt}$. Spasi s tidak boleh melebihi $d / (8\beta b)$

Dimana: β adalah rasio dimensi panjang terhadap pendek: bentang bersih untuk pelat dua arah, sisi kolom, beban terpusat atau luasan reaksi, atau sisi fondasi telapak



Gambar 2.15. Penyaluran tulangan lentur dalam balok menerus yang tipikal (R9.7.3.2)

2.12.1.2. Penyaluran Tulangan Momen Positif

Pada **tumpuan sederhana**, setidaknya **sepertiga** dari tulangan **momen positif maksimum** harus diteruskan sepanjang bawah balok sampai ke tumpuan, kecuali untuk balok pracetak dimana tulangan tersebut harus diteruskan sekurang-kurangnya sampai pusat panjang landasan (Pasal 9.7.3.8.1).

Pada **tumpuan lain**, sedikitnya **seperempat** dari tulangan **momen positif maksimum** harus diteruskan sepanjang bawah balok ke tumpuan sekurang-kurangnya **150 mm** dan, jika balok merupakan bagian dari sistem penahan beban lateral utama, harus diangkur (Pasal 9.7.3.8.2). Pada tumpuan sederhana dan titik balik, d_b untuk tulangan tarik momen positif harus dibatasi sedemikian rupa sehingga l_d dapat memenuhi a) atau b).

2.12.1.3. *Penyaluran Tulangan Momen Negatif*

Setidaknya **sepertiga dari tulangan momen negatif** pada tumpuan harus memiliki panjang penyaluran melewati titik balik sekurang-kurangnya terbesar dari **d, 12d_b, dan l_n/16** (Pasal 9.7.3.8.4).

2.12.1.4. *Tulangan Balok dalam Kolom dan Dimensi Kolom*

Tulangan longitudinal balok yang dihentikan di dalam suatu kolom harus diteruskan ke muka terjauh dari inti kolom terkekang dan harus disalurkan dalam tarik sesuai Pasal 18.8.5 (lihat 3.8.1.1) dan dalam tekan sesuai Pasal 25.4.9. (lihat 3.8.1.2)

Bila tulangan longitudinal balok diteruskan melalui joint balok-kolom, **dimensi kolom** yang parallel dengan tulangan balok tersebut tidak boleh kurang dari **20 kali diameter** tulangan longitudinal terbesar balok untuk beton normal (Pasal 18.8.2.3).

2.12.2. Panjang Penyaluran

Terdapat dua jenis panjang penyaluran yaitu panjang penyaluran tarik dan panjang penyaluran tekan. Sedangkan pada penyaluran tarik terdapat penyaluran tarik: tanpa kait dan dengan kait.

2.12.2.1. *Panjang Penyaluran Tarik*

Terdapat 2 jenis penyaluran tarik yaitu memakai kait dan tanpa kait

2.12.2.1.1. *Tanpa kait*

Panjang penyaluran tulangan tarik tanpa kait l_d harus memenuhi (Pasal 25.4.2) yaitu a) dan b) dinyatakan dalam Tabel 2.9:

a. Tabel 2.9. Panjang penyaluran tarik l_d (Pasal 25.4.2.2 atau 25.4.2.3 dengan faktor modifikasi)

Kondisi	$\leq D19$	$\geq D22$
Spasi bersih batang yg disalurkan/ disambung lewatkan $\geq d_b$ Selimut beton $\geq d_b$ Senggang sepanjang $l_d \geq$ standar minimum	$\left[\frac{f_y \psi_t \psi_e}{2,1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$\left[\frac{f_y \psi_t \psi_e}{1,7 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$
Kasus lain	$\left[\frac{f_y \psi_t \psi_e}{1,4 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$\left[\frac{f_y \psi_t \psi_e}{1,1 \lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b$

b. 300mm

Secara sederhana: bila f'_c 28 MPa, f_y 420 MPa (R25.4.2)

- Selimut minimum d_b , spasi minimum $2d_b$, maka $l_d \geq 47 d_b$
- Selimut minimum d_b , spasi minimum d_b , senggang minimal terpenuhi maka $l_d \geq 47 d_b$
- Selimut kurang maka $l_d \geq 72 d_b$

Panjang penyaluran l_d harus dihitung dengan Pasal 25.4.2.3

$$l_d = \left[\frac{f_y}{1,1\lambda\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t\psi_e\psi_s}{\frac{c_b+K_{tr}}{d_b}} \right] d_b \quad (2.25)$$

$$\frac{c_b+K_{tr}}{d_b} \leq 2,5 \quad (2.25.a)$$

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{s_n} \quad (2.25.b)$$

- n : jumlah batang/kawat yang disambunglewatkan. K_{tr} boleh dianggap 0
 c_b : yang terkecil dari: a) jarak dari pusat batang tulangan atau kawat ke permukaan beton terdekat, dan b) setengah spasi pusat ke pusat batang tulangan atau kawat yang disalurkan, mm

Untuk tulangan D10 hingga D36, panjang penyaluran tulangan tarik l_d jenis tulangan lurus (tanpa kait) tidak boleh kurang dari nilai terbesar antara a) dan b) (Pasal 18.8.5.3) Pasal 18.8.5.3:

- 2,5 kali panjang sesuai 18.8.5.1 bila beton yang dicor di bawah tulangan tersebut tidak melebihi 300 mm
- 3,25 kali panjang sesuai 18.8.5.1 bila tinggi beton yang dicor bersamaan di bawah batang tulangan melebihi 300 mm.

Pasal 18.8.5.1:

$$a. \frac{f_y d_b}{5,4 \lambda \sqrt{f'_c}} \quad b. 8d_b \quad c. 150\text{mm} \quad (2.26)$$

Tulangan lurus yang berhenti pada *joint* harus melewati inti terkekang kolom atau elemen batas. Semua bagian λd yang tidak berada di dalam inti terkekang harus diperpanjang dengan faktor sebesar 1,6 kali (18.8.5.4).

Jika tulangan terputus melewati garis tengah tumpuan tanpa kait a) atau b) **perlu** dipenuhi (Pasal 9.7.3.8.3).

$$a) \ell_d \leq (1,3M_n/V_u + \ell_a) \text{ jika ujung tulangan dikekang oleh reaksi tekan} \quad (2.27.a)$$

$$b) \ell_d \leq (M_n/V_u + \ell_a) \text{ jika ujung tulangan tidak dikekang oleh reaksi tekan} \quad (2.27.b)$$

M_n dihitung dengan asumsi semua tegangan tulangan pada penampang mencapai f_y dan V_u dihitung pada penampang tersebut.

2.12.2.1.2. Dengan kait

Panjang penyaluran dengan kait disebut l_{dh} . Kait adalah sebagai berikut Tabel 2.10 atau Tabel 25.3.1. SNI

Tabel 2.10. Geometri kait standar untuk penyaluran batang ulir pada kondisi tarik

Tipe kait standar	Ukuran batang	Diameter sisi dalam bengkokan minimum	Perpanjangan lurus ⁽¹⁾ ℓ_{ext} , mm	Tipe kait standar
Kait 90 derajat	D10 hingga D 25	$6d_b$	$12d_b$	
	D29 hingga D 36	$8d_b$		
	D43 hingga D57	$10d_b$		
Kait 180 derajat	D10 hingga D25	$6d_b$	terbesar dari $4d_b$ dan 65 mm	
	D29 hingga D36	$8d_b$		
	D43 hingga D57	$10d_b$		

⁽¹⁾ Kait standar untuk batang ulir pada kondisi tarik termasuk diameter sisi dalam bengkokan tertentu dan panjang perpanjangan lurus. Diizinkan untuk menggunakan perpanjangan lurus yang lebih besar pada ujung kaitnya. Penambahan perpanjangan lurus tidak diperkenankan untuk meningkatkan kapasitas pengangkutan pada kait.

Penyaluran kait standar dalam kondisi tarik (l_{dh}) untuk D10-D36 harus memenuhi:

Pasal 25.4.3.1:

$$a. \left[\frac{0,24f_y \psi_e \psi_c \psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b \quad (2.28.a)$$

$$b. 8d_b \quad (2.28.b)$$

$$c. 150\text{mm} \quad (2.28.c)$$

Pasal 18.8.5.1:

$$a. \frac{f_y d_b}{5,4 \lambda \sqrt{f'_c}} \quad (2.29.a)$$

$$b. 8d_b \quad (2.29.b)$$

$$c. 150\text{mm} \quad (2.29.c)$$

Kait harus ditempatkan dalam inti terkekang kolom atau elemen batas, dengan kait ditekuk ke dalam *joint*.

Jika tulangan terputus melewati garis tengah tumpuan dengan ujung kait standar atau pengangkutan mekanis yang setidaknya setara dengan kait standar, a) atau b) **tidak perlu** dipenuhi (Pasal 9.7.3.8.3).

$$a) \ell d \leq (1,3M_n V_u + \ell a) \text{ jika ujung tulangan dikekang oleh reaksi tekan} \quad (2.30.a)$$

$$b) \ell d \leq (M_n V_u + \ell a) \text{ jika ujung tulangan tidak dikekang oleh reaksi tekan} \quad (2.30.b)$$

M_n dihitung dengan asumsi semua tegangan tulangan pada penampang mencapai f_y dan V_u dihitung pada penampang tersebut.

Dimana: l_a adalah panjang penyaluran yang melewati

di tumpuan : pusat tumpuan

di titik balik : titik balik, dibatasi dengan nilai terbesar dari d atau $12d_b$.

2.12.2.1.3. Faktor modifikasi

Faktor modifikasi panjang penyaluran tanpa dan dengan kait disajikan pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Faktor modifikasi λ dan Ψ panjang penyaluran tarik tanpa dan dengan kait

Tanpa kait (l_d) Tabel 25.4.2.4 SNI			Dengan kait (l_{dh}) Tabel 25.4.3.2 SNI		
Jenis	Kondisi	Faktor	Jenis	Kondisi	Faktor
Bobot beton λ	Beton ringan tertentu	0,75	Bobot beton λ	Beton ringan	0,75
	Beton ringan dg f_{ct} tertentu	19.2.4.3		Beton normal	1
	Beton normal	1			
Epoksi Ψ_e	Tulangan dg pelapis epoksi/seng & pelapis ganda epoksi dg selimut bersih $< 3d_b$ atau spasi $< 6d_b$	1,5	Epoksi Ψ_e		
	Tulangan dg pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi dg kondisi lain	1,2		Tulangan dg pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi	1,2
	Tulangan tanpa pelapis atau pelapis seng (galvanis)	1		Tulangan tanpa pelapis atau pelapis seng (galvanis)	1
Ukuran Ψ_s	$\geq D 22$	1	Selimut Ψ_c	- $\leq D36$, selimut samping $\geq 65\text{mm}$ - Kait 90° , selimut pd perpanjangan batang di luar kait $\geq 50\text{mm}$	0,7
	$\leq D19$	0,8		Lainnya	1
Posisi pengecoran [1] Ψ_t	$>30\text{mm}$ beton segar di bawah tulangan horizontal	1,3	Tulangan pengekrang [2] Ψ_r	1. Untuk kait 90° , $\leq D36$ dilingkupi sengkang l_{dh} sengkang ikat/ tegak lurus terhadap l_{dh} pada $s \leq 3d_b$ 2. Dilingkupi sepanjang perpanjangan tulangan melewati kait termasuk bengkokan dg sengkang ikat atau sengkang [1] yg tegak lurus thd l_{ext} pd $s \leq 3d_b$	0,8
	Lainnya	1		Untuk kait 180° , $\leq D36$ dilingkupi sepanjang l_{dh} dg sengkang ikat atau sengkang [1] yg tegak lurus thd l_{dh} pd $s \leq 3d_b$	
[1] hasil $\Psi_t \Psi_c < 1,7$				Lainnya	1

l_{ext} : perpanjangan bagian lurus pada ujung kait standar

f_{ct} : kekuatan tarik belah rata-rata terukur beton ringan, MPa

2.12.2.1.4. Ujung tidak menerus

Lokasi kritis penyaluran tulangan adalah titik-titik tegangan maksimum dan titik-titik di sepanjang bentang dimana tulangan tarik yang dibengkokkan atau diputus tidak diperlukan lagi untuk menahan lentur (Pasal 9.7.3.2).

Untuk balok yang tidak menerus, dan selimut samping, atas dan bawah < 65mm, harus memenuhi Pasal 25.4.3.3. sebagai berikut:

- Kait harus dilingkupi sengkang sepanjang l_{dh} dengan $s \leq d_b$
- Sengkang pertama dipasang sejarak $2d_b$ di sisi terluar bengkokan
- $\Psi_r = 1$ dalam menghitung l_{dh} sesuai Pasal 25.4.3.1a.

2.12.2.2. Panjang Penyaluran Tulangan Tekan

Pasal 25.4.9. Panjang penyaluran untuk tekan disebut l_{dc} yang terbesar dari:

$$a. \text{ Pasal 25.4.9.2: } l_{dc} = \left[\frac{0,24 f_y \Psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right] d_b \quad (2.31.a)$$

$$b. \text{ Pasal 25.4.9.2: } l_{dc} = 0,043 f_y \Psi_r d_b \quad (2.31.b)$$

- 200 mm

Panjang penyaluran tekan l_{dc} harus dimodifikasi sesuai Tabel 25.4.9.3 SNI atau Tabel 2.12.

Tabel 2.12. Faktor modifikasi λ dan ψ panjang penyaluran tekan

Faktor modifikasi	Kondisi	Nilai
Bobot beton λ	Beton ringan	0,75
	Beton ringan bila f_{ct} disyaratkan	Sesuai Pasal 19.2.4.3
	Beton normal	1,0
Tulangan pengekang Ψ_r	Tulangan dilingkupi oleh 1,2,3,4: 1. Tulangan spiral 2. Tulangan lingkaran menerus dengan $d_b \geq 6mm$ dan jarak 100mm 3. Sengkang D13 atau pengikat kawat D10 yang sesuai 25.7.4. dengan spasi $\leq 100mm$ 4. Sengkang pengekang yang sesuai 25.7.4 spasi $\leq 100mm$	0,75
	Lainnya	1,0

Efek perlemahan yang disebabkan oleh retak akibat gaya tarik lentur tidak terdapat pada batang dan kawat pada daerah tekan, dan biasanya daya dukung ujung dari batang pada beton sangat bermanfaat. Oleh karena itu, panjang penyaluran yang lebih pendek digunakan secara lebih khusus pada daerah tekan dibandingkan dengan daerah daerah tarik (R25.4.9.1).

Panjang penyaluran l_{dc} untuk batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tekan harus yang terbesar dari a) dan b)

- a) dihitung berdasarkan Pasal 25.4.9.2
- b) 200 mm

Nilai l_{dc} harus yang terbesar dari a) dan b), menggunakan faktor modifikasi sesuai dengan Pasal 25.4.9.2:

$$\left(\frac{0,24 f_y \psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad (2.32.a)$$

$$0,043 f_y \psi_r d_b \quad (2.32.b)$$

2.12.3. Spasi

Untuk tulangan sejajar spasi bersih adalah nilai terbesar dari: 25mm, d_b dan $(4/3)d_{agr}$ (Pasal 25.2).

Bila lebih dari 1 lapis, maka tulangan lapis di atas harus berada tepat di atas tulangan lapis di bawahnya dengan $s \geq 25\text{mm}$