

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Suatu elemen balok akan mengalami dua kondisi yaitu kondisi tekan dan kondisi tarik, yang hal ini antara lain karena adanya pengaruh lentur ataupun gaya lateral. Sedangkan balok dalam perencanaannya dapat memakai tulangan tunggal dan tulangan rangkap. Pemakaian tulangan tunggal hanya memakai tulangan tarik saja dan pemakaian tulangan rangkap menggunakan tulangan tarik dan tulangan tekan. Pemakaian tulangan tekan pada balok ini tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan tulangan tariknya karena suatu balok beton mempunyai kekuatan tekan yang relatif tinggi.

Penggunaan tulangan rangkap pada umumnya berada pada daerah perletakan karena pada daerah ini terjadi kondisi tekan sehingga diperlukan tulangan tekan. Pada tengah bentang boleh tidak digunakan tulangan rangkap karena pada daerah ini terjadi kondisi tarik sehingga diharuskan adanya tulangan tarik. Namun dalam hal ini hampir semua tulangan tarik diteruskan ke perletakan sehingga dapat berfungsi sebagai tulangan tekan. Panjang penyaluran tulangan harus cukup diberikan juga tulangan-tulangan tarik dan tekan yang harus terikat baik dengan sengkang tertutup untuk mencegah terjadinya tekuk tulangan tekan.

Pada SNI 03-2847-2002 pasal 14.12 ayat 3 menyatakan bahwa paling sedikit sepertiga dari jumlah tulangan tarik total yang dipasang untuk momen negatif pada suatu tumpuan harus ditanamkan berdasarkan syarat-syarat yang ditentukan begitu pula pada pasal 14.11 ayat 1 juga menyatakan paling sedikit sepertiga dari tulangan momen positif pada komponen struktur sederhana dan seperempat dari tulangan momen positif komponen struktur menerus harus diteruskan ke dalam tumpuan. Hal ini juga yang membuat penggunaan tulangan rangkap sering juga digunakan sebagai pertimbangan teknis pelaksanaan dan arsitektural yang membatasi dimensi balok. Di dalam balok yang menggunakan tulangan rangkap untuk mengurangi ukuran penampang, maka lendutan (defleksi) yang terjadi boleh jadi akan berkurang.

Lendutan terjadi karena adanya beban yang bekerja pada balok. Lendutan yang besar akan mengganggu kemampuan layan atau kinerja struktur pada beban kerja. Lendutan yang diijinkan pada sistem struktur sangat tergantung pada besarnya lendutan yang masih bisa ditahan oleh komponen-komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan estetis dan tanpa kerusakan pada elemen yang mengalami lendutan.

2.2. Beton Bertulang

Beton bertulang adalah merupakan gabungan logis dari dua jenis bahan yaitu beton yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi kekuatan tarik yang rendah dan batangan-batangan baja yang ditanamkan di dalam beton dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Baja dan beton dapat bekerjasama atas dasar beberapa alasan :

1. lekatan (interaksi antara baja dengan beton keras sekelilingnya) yang mencegah selip (slip) dari baja relatif terhadap beton.
2. campuran beton yang memadai memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton untuk mencegah karat baja.
3. angka kecepatan muai yang hampir serupa yakni dari 0,000010 sampai dengan 0,000013 untuk beton dan 0,000012 untuk baja per derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$) yang menimbulkan tegangan antara baja dan beton yang dapat diabaikan di bawah perubahan suhu udara.

Sedangkan beberapa sifat-sifat yang sangat berbeda dari beton dan baja dapat dilihat dari tabel 2.1. berikut ini :

Tabel 2.1. Perbedaan Sifat- Sifat Beton dan Baja

	Beton	Baja
Kekuatan tarik	Jelek	Bagus
Kekuatan tekan	Bagus	Bagus,tetapi batang yang langsing akan menekuk
Kekuatan geser	Cukup	Bagus
Keawetan	Bagus	Berkarat bila tidak terlindung
Ketahanan akan kebakaran	Bagus	Jelek-mengalami kehilangan kekuatan secara cepat pada temperatur tinggi

Sumber : Perencanaan Beton Berutulang, Mosley & Bungey

2.3. Hubungan Tegangan – Regangan Beton dan Baja

Beban-beban pada suatu konstruksi menyebabkan penggeliatan bagian konstruksi (member), yang mengakibatkan terjadinya tegangan dan regangan di dalam beton dan tulangan baja. Untuk menyelesaikan analisis dan perencanaan suatu bagian konstruksi, adalah perlu memiliki pengetahuan mengenai hubungan antara tegangan-regangan dan regangan-regangan tersebut. Pengetahuan ini terutama penting dalam membahas beton bertulang yang merupakan suatu bahan yang komposit, sebab dalam hal ini, analisis tegangan pada penampang melintang dari suatu bagian konstruksi harus mempertimbangkan keseimbangan gaya-gaya di dalam beton dan baja, dan juga kesesuaian regangan yang melintasi tampang melintang tersebut.

2.3.1. Hubungan Tegangan – Regangan Beton

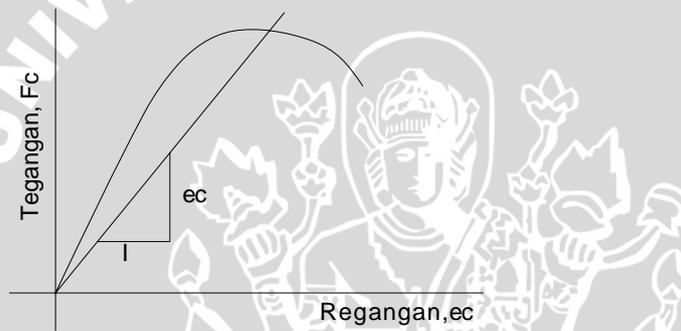
Beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat yang mempunyai perkisaran luas dari kekuatan dan kurva tegangan-regangan. Saat beban bekerja, perbandingan antara tegangan dan regangan mula-mula hampir linear (gambar 2.1) dan perilaku sifat beton hampir seperti suatu bahan elastis yang benar-benar pulih kembali perubahan bentuknya secara utuh apabila beban diiadakan. Selanjutnya kurva tidak linear lagi dan beton makin berperilaku sebagai suatu bahan plastik. Apabila beban diiadakan selama rentang keadaan plastik, pemulihan kembali tidak akan sempurna dan akan tertinggal suatu deformasi permanen. Regangan ultimit untuk kebanyakan konstruksi beton cenderung merupakan suatu harga konstan sebesar kira-kira 0,0035, tanpa mempedulikan kekuatan betonnya.

2.3.2. Hubungan Tegangan – Regangan Baja

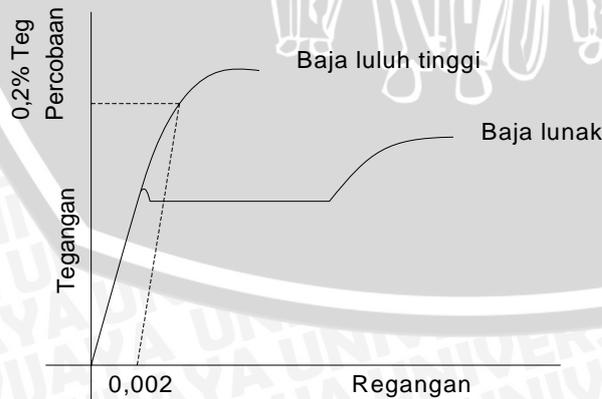
Deforamasi baja juga tergantung pada lama waktu pembebanan. Pada gambar 2.2 meperlihatkan kurva tipikal untuk tegangan-regangan bagi (a) baja lunak (mild steel) dan (b) baja luluh tinggi (high yield steel). Baja lunak bersifat seperti suatu bahan elastik, denngan regangan sebanding terhadap tegangan sampai pada titik luluh (yield point); pada titik mana terjadi peningkatan regangan

mendadak tanpa adanya perubahan dalam tegangan. Setelah melewati titik luluh, baja lunak merupakan suatu bahan plastik dan regangan meningkat dengan cepat sampai ke harga ultimit. Sebaliknya, baja luluh tinggi tidak mempunyai suatu titik luluh tertentu, tetapi memperlihatkan perubahan yang berangsur-angsur dari perilaku elastik ke perilaku plastik.

Kekuatan yang ditetapkan untuk digunakan dalam perencanaan didasarkan pada tegangan luluh untuk baja lunak, sedang untuk baja luluh tinggi kekuatan didasarkan pada tegangan percobaan yang ditetapkakan. Suatu harga tegangan percobaan sebesar 0,2 % ditandai oleh garis putus-putus yang ditarik sejajar dengan bagian yang linear dari kurva tegangan-regangan (gambar 2.2)



Gambar 2.1. Diagram tegangan-regangan pada beton
 Sumber : Perencanaan Beton Berutulang, Mosley & Bungey



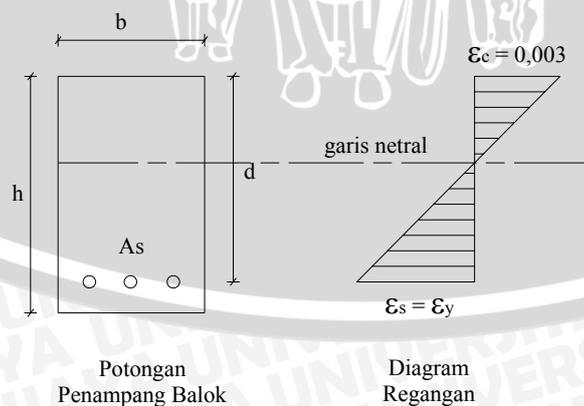
Gambar 2.2. Diagram tegangan-regangan pada baja
 Sumber : Perencanaan Beton Berutulang, Mosley & Bungey

2.4. Penampang Balok Bertulangan Seimbang, Lebih, dan Kurang

Prinsip-prinsip dasar teori lentur dapat digunakan pada analisis penampang. Untuk letak garis netral tertentu, perbandingan antara regangan baja dengan regangan beton maksimum dapat ditetapkan berdasarkan distribusi regangan linier. Sedangkan letak garis netral tergantung pada jumlah tulangan baja tarik yang dipasang dalam suatu penampang sedemikian sehingga blok tegangan tekan beton mempunyai kedalaman cukup agar dapat tercapai keseimbangan gaya-gaya, dimana resultante tegangan tekan seimbang dengan resultante tegangan tarik ($\Sigma H = 0$).

2.4.1. Penampang Balok Bertulangan Seimbang (*Balanced*)

Apabila pada penampang balok beton bertulang tersebut luas tulangan baja tariknya ditambah, kedalaman blok tegangan beton tekan akan bertambah pula, dan oleh karenanya letak garis netral akan bergeser ke bawah lagi. Apabila jumlah tulangan tarik sedemikian sehingga letak garis netral pada posisi dimana akan terjadi secara bersamaan regangan luluh pada baja tarik dan regangan beton tekan maksimum 0,003 maka penampang disebut bertulangan seimbang. Keruntuhan penampang dengan kondisi seperti ini disebut keruntuhan imbang (*balance failure*). Namun keruntuhan seperti ini mungkin bukan merupakan keruntuhan dari suatu struktur. Kondisi keseimbangan regangan menempati posisi penting karena merupakan pembatas antara dua keadaan penampang balok beton bertulang yang berbeda cara hancurnya.

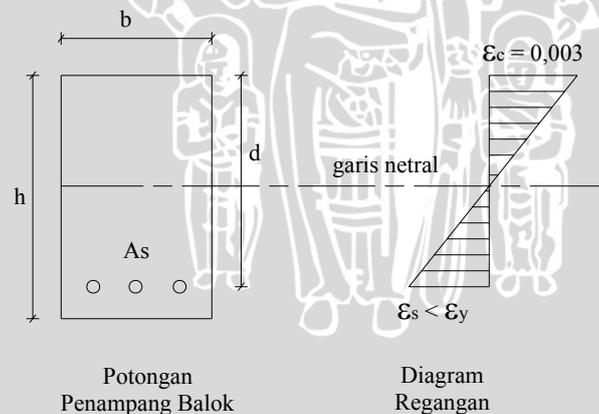


Gambar 2.3. Penampang Balok dengan Penulangan Seimbang

2.4.2. Penampang Balok Bertulangan Lebih (*Overreinforced*)

Penampang balok beton bertulangan yang mengandung jumlah tulangan baja tarik lebih banyak dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan disebut penampang bertulangan lebih (*overreinforced*). Berlebihnya tulangan baja tarik mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah. Hal yang demikian pada gilirannya akan berakibat beton mendahului mencapai regangan maksimum 0,003 sebelum tulangan baja tariknya luluh.

Apabila penampang balok tersebut dibebani momen lebih besar lagi, yang berarti regangannya semakin besar sehingga kemampuan regangan beton terlampaui, maka akan berlangsung keruntuhan dengan beton hancur secara mendadak tanpa diawali dengan gejala-gejala peringatan terlebih dahulu. Keruntuhan dengan kondisi seperti ini disebut keruntuhan tekan (*compression failure*). Keruntuhan semacam ini terjadi secara tiba-tiba, bahkan sering disertai bunyi ledakan beton hancur, dan sebelumnya tidak ada tanda-tanda berupa defleksi yang besar. Pada perencanaan suatu penampang struktur balok umumnya dihindari perencanaan penampang dengan kondisi tulangan seperti ini karena akan sangat berbahaya dengan tipe keruntuhan yang akan terjadi.



Gambar 2.4. Penampang Balok dengan Penulangan Lebih

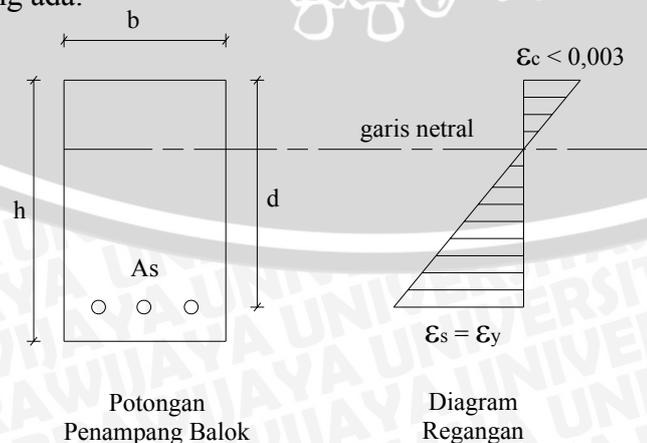
2.4.3. Penampang Balok Bertulangan Kurang (*Underreinforced*)

Penampang balok beton bertulangan yang mengandung jumlah tulangan baja tarik kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan disebut penampang bertulangan kurang (*underreinforced*). Letak garis netral akan lebih naik sedikit daripada keadaan seimbang, dan tulangan baja tarik akan mendahului

mencapai regangan luluhnya (tegangan luluhnya) sebelum beton mencapai regangan maksimum 0,003.

Pada tingkat keadaan ini, bertambahnya beban akan mengakibatkan tulangan baja mulur (memanjang) cukup banyak sesuai dengan perilaku bahan baja, dan berarti bahwa baik regangan beton maupun baja terus bertambah tetapi gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja tidak bertambah besar. Dengan demikian berdasarkan keseimbangan gaya-gaya horizontal $\Sigma H = 0$, gaya beton tekan tidak mungkin bertambah sedangkan tegangan tekannya terus meningkat berusaha mengimbangi beban, sehingga mengakibatkan luas daerah tekan beton pada penampang menyusut atau berkurang yang berarti posisi garis netral akan berubah bergerak naik.

Proses tersebut di atas terus berlanjut sampai suatu saat daerah tekan beton yang terus berkurang tidak mampu lagi menahan gaya tekan dan hancur sebagai efek sekunder. Cara hancur demikian, yang sangat dipengaruhi oleh peristiwa meluluhnya tulangan baja tarik berlangsung meningkat secara bertahap. Segera setelah baja tarik mencapai titik luluh, lendutan balok meningkat tajam sehingga dapat merupakan tanda awal dari kehancuran. Penampang akan mengalami deformasi plastis yang cukup besar sehingga menimbulkan retak-retak pada daerah tarik yang merupakan tanda bahwa balok tersebut hancur. Keruntuhan semacam ini disebut keruntuhan tarik (*tension failure*). Pada perencanaan penampang struktur balok umumnya digunakan perencanaan penampang dengan kondisi seperti ini, karena tipe keruntuhan yang terjadi dapat diketahui dengan tanda-tanda yang ada.

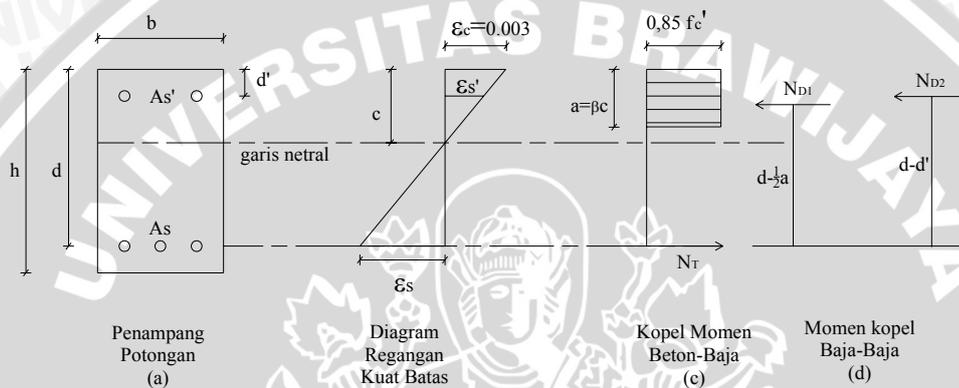


Gambar 2.5. Penampang Balok dengan Penulangan Kurang

2.5. Penampang Balok Bertulangan Rangkap

2.5.1. Analisa Balok Bertulangan Rangkap

Apabila besar penampang suatu gelagar dibatasi, mungkin dapat terjadi keadaan dimana kekuatan tekan beton tidak dapat memenuhi tekan yang ditimbulkan akibat bekerjanya momen lentur. Dalam keadaan seperti ini dapat ditambah tulangan dalam daerah tekan, yang akan menghasilkan apa yang disebut sebagai gelagar dengan tulangan rangkap, yaitu gelagar yang mempunyai baik tulangan tarik maupun tekan. (Winter, 1993 hal. 120)



Gambar 2.6. Analisa Balok Bertulangan Rangkap

Sumber: Struktur Beton Bertulang, Istimawan Dipohusodo

Pada analisis tulangan rangkap, anggapan-anggapan dasar yang digunakan untuk menganalisisnya pada dasarnya sama dengan balok bertulangan tarik saja, hanya ada satu tambahan anggapan yang penting ialah bahwa tegangan tulangan baja tekan (f_s') merupakan fungsi dari regangannya tepat pada titik berat tulangan baja tekan. Terdapat dua kondisi umum yang dapat digunakan dalam menganalisa keberadaan tulangan rangkap ini, yaitu:

1. Tulangan baja berperilaku elastik hanya sampai pada tingkat dimana regangannya luluh (ϵ_y). Apabila regangan tekan baja (ϵ_s') sama atau lebih besar dari regangan luluhnya (ϵ_y) maka sebagai batas maksimum tegangan tekan baja (f_s') diambil sama dengan tegangan luluhnya (f_y), sedangkan bila regangan tekan baja yang terjadi kurang dari regangan luluhnya maka tegangan tekan baja $f_s' = \epsilon_s' \cdot E_s$

2. Apabila letak garis netral penampang balok relatif tinggi, ada kemungkinan pada saat momen ultimit terjadi, regangan $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ (belum mencapai luluh).

Untuk tercapainya masing-masing kondisi (keadaan) tersebut tergantung dan posisi garis netral penampang yang terjadi. Kuat momen total balok bertulangan rangkap merupakan penjumlahan kedua kopel momen dalam dengan mengabaikan luas beton tekan yang ditempati oleh tulangan baja tekan.

Dengan menganggap tulangan baja tarik dan tekan telah meluluh, sehingga :

$$f_s = f_s' = f_y \quad (2-1)$$

Keseimbangan gaya-gaya : $\Sigma(H) = 0$, sehingga $f_s' = f_y$:

$$N_T = N_{D1} + N_{D2} \quad (2-2)$$

$$A_s f_y = 0,85 f_c' ab + A_s' f_y$$

Nilai a didapatkan dari persamaan berikut :

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{(0,85 f_c') b} \quad (2-3)$$

Dengan menggunakan anggapan sama dengan yang dipakai pada balok bertulangan tarik saja tentang hubungan antara tinggi blok tegangan beton tekan dengan garis netral penampang balok terhadap serat tepi tekan ($a = \beta c$), maka letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan-regangan tulangan baja.

$$c = \frac{a}{0,85} \quad (2-4)$$

Pemeriksaan regangan-regangan untuk mengetahui apakah asumsi yang digunakan benar, yang berarti bahwa kedua penulangan baik tulangan tekan maupun tarik telah meluluh sebelum beton hancur seperti yang terlihat pada gambar 2.6. b.

Regangan yang diperhitungkan terjadi pada saat dicapai momen ultimit, adalah :

$$\varepsilon_s' = \left(\frac{c - d'}{c} \right) 0,003 \quad (2-5)$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) 0,003 \quad (2-6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (2-7)$$

Apabila $\varepsilon_s' < \varepsilon_y$ dan $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$ untuk mendapatkan nilai c digunakan persamaan sebagai berikut:

$$A_s f_y = (0,85 f'_c)ab + A'_s f'_s \quad (2-8)$$

$$f'_s = 0,003 \cdot \left(\frac{c-d'}{c} \right) E_s \quad (2-9)$$

$$f'_s = 0,003 \left(1 - \frac{\beta \cdot d'}{a} \right) E_s \quad (2-11)$$

$$A_s f_y = (0,85 f'_c)ab + A'_s \cdot 0,003 \left(1 - \frac{\beta \cdot d'}{a} \right) E_s \quad (2-12)$$

Menghitung kuat momen tahanan ideal untuk masing-masing kopel :

$$M_n = N_{D1} \cdot (d - \frac{1}{2} a) + N_{D2} \cdot (d - d') \quad (2-13)$$

Dari uraian diatas pada penampang balok persegi dengan penulangan tarik saja yang bertugas menahan tekanan adalah beton, sedangkan pada balok bertulang rangkap yang bertugas adalah beton bersama-sama dengan baja tekan. Penampangnya secara teoritis dibagi menjadi dua bagian sebagaimana yang diperlihatkan pada gambar 2.6. Pada bagian balok yang mengalami tekan, gaya desak akan diterima oleh beton dan baja tulangan. Berdasarkan rumus 2-2 Nilai N_{D2} dipengaruhi oleh besarnya luas tulangan. Dimana $N_{D2} = A'_s f'_s$, maka semakin besar luas tulangan tekan (A'_s) nilai M_n totalnya akan semakin besar.

Suatu penampang balok yang mengalami lentur dan yang mempunyai tulangan yang jumlahnya kurang dari pada yang diperlukan untuk mencapai keadaan seimbang batas, disebut penampang yang bertulang lemah. Keadaan batas penampang demikian akan tercapai pada regangan tekan beton maksimum sebesar regangan batas $\varepsilon_c = 0,003$ dan regangan tarik baja tulangan ε_s yang melampaui regangan pada penulangan titik leleh ε_y . Penampang-penampang yang

mengalami lentur harus direncanakan sedemikian rupa hingga tulangnya berupa tulangan lemah karena keadaan ini menjamin kemampuan rotasi yang besar pada penampang-penampang kritis, dimana keruntuhan balok diawali oleh peringatan berupa lendutan yang semakin besar.

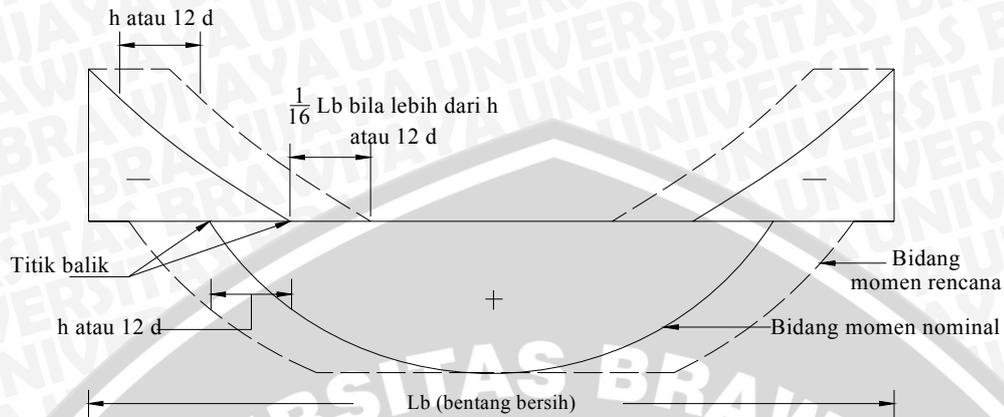
Suatu penampang balok yang mengalami lentur dan yang mempunyai tulangan yang jumlahnya lebih daripada yang diperlukan untuk mencapai keadaan seimbang batas, disebut penampang yang bertulangan kuat. Keadaan batas penampang demikian juga akan tercapai pada regangan tekan beton maksimum sebesar regangan batas $\epsilon_c = 0,003$, tetapi dengan regangan tarik baja tulangan ϵ_s yang belum mencapai regangan pada permulaan titik leleh ϵ_y . Penampang-penampang kritis demikian tidak memiliki kemampuan rotasi yang besar, sehingga kemampuan konstruksi untuk mengadakan redistribusi momen dan gaya-gaya pada keadaan batas sangat terbatas, disertai dengan keruntuhan yang mendadak tanpa diawali oleh suatu peringatan.

2.5.2. Penyaluran Tulangan

Besarnya tegangan tulangan yang dihitung pada tiap penampang perlu disalurkan dengan panjang penyaluran yang cukup atau pengankuran ujung atau kombinasi dari keduanya. Untuk kasus yang biasa terjadi, apabila tidak dipakai pengankuran ujung, ini berarti harus diberikan panjang penyaluran l_d setelah penampang kritis dimana terjadi tegangan puncak pada tulangan. Penampang kritis ini terletak pada titik-titik momen maksimum dan pada titik-titik dimana pemberhentian tulangan yang berdekatan tidak lagi dibutuhkan untuk memikul momen lentur.

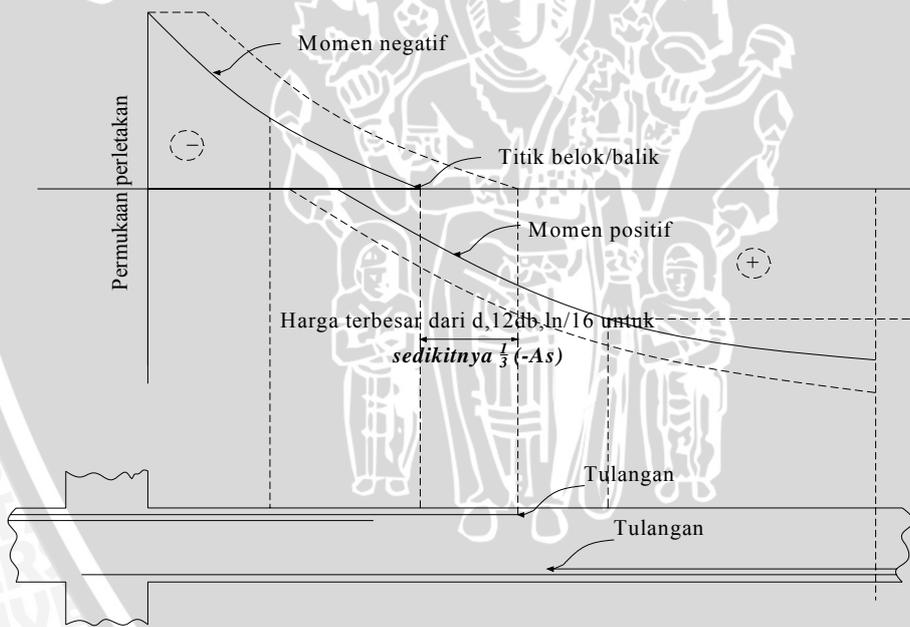
Tulangan lentur yang diperlukan pada suatu penampang harus diperpanjang melalui penampang tersebut, sejauh tinggi manfaat bagian konstruksi atau 12 kali diameter batang tulangan, dimana nilai yang terbesar adalah yang dipakai. Ketentuan-ketentuan diatas tidak berlaku untuk tumpuan-tumpuan bebas dan untuk ujung bebas dari kantilever-kantilever. Penentuan syarat-syarat diatas adalah untuk mengatasi akibat-akibat dari redistribusi tegangan-tegangan setelah terjadinya retak-retak miring di sekitar tumpuan yang

ekivalen dengan pergeseran bidang momen nominal. Dijelaskan dalam Gambar 2.7 sebagai berikut :



Gambar 2.7. Bidang momen dasar untuk beban terbagi rata

Sumber : PBTI 1971, hal. 70



Gambar 2.8. Persyaratan-persyaratan penyaluran tulangan

Sumber : Winter, 1993 hal. 155

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa garis penuh adalah menunjukkan bidang momen nominal, sedangkan garis terputus-putus menunjukkan bidang momen rencana. Dimana dapat dilihat bahwa dapat terjadi pergeseran momen nominal sehingga perlunya perpanjangan tulangan untuk mengatasi akibat dari

redistribusi tegangan-tegangan yang terjadi. Dengan memperhatikan kemungkinan terjadinya perubahan lokasi tegangan puncak, pedoman ACI mensyaratkan bahwa paling sedikit sepertiga tulangan momen positif (seperempat pada bentang menerus) harus dipasang menerus tanpa terputus sepanjang permukaan yang sama dari gelagar pada suatu jarak sedikitnya 6 inchi masuk ke dalam perletakan. Sedikitnya, sepertiga dari jumlah tulangan momen negatif pada perletakan harus diperpanjang melampui titik balik dengan suatu jarak tidak kurang dari seperenam belas jarak bentang bersih atau d atau $12 d_b$, tergantung pada harga yang lebih besar. (Winter, 1993 hal 154)

Menurut SNI 03-2847-2002 pasal 14.12 ayat (3) juga dikatakan bahwa paling sedikit sepertiga dari jumlah tulangan tarik total yang dipasang untuk momen negatif pada suatu tumpuan harus ditanamkan hingga melewati titik belok sejauh tidak kurang dari nilai terbesar antara tinggi efektif komponen struktur, $12 d_b$, atau seperenambelas bentang bersih (Gambar 2.7 dan Gambar 2.8).

2.6. Perhitungan Lendutan

Syarat kemampu layanan yang juga harus diperhatikan adalah masalah lendutan. Lendutan yang perlu diperhatikan adalah yang terjadi pada kondisi pembebanan normal. Dalam keadaan bekerja, suatu struktur memikul beban mati sepenuhnya ditambah dengan beberapa bagian atau seluruh beban hidup perencanaan maksimum. Faktor keamanan yang biasa dipakai memberikan kepastian bahwa pada saat memikul beban kerja, tulangan atau beton tidak akan mengalami tegangan yang besarnya berada diluar batas daerah elastis masing-masing bahan tersebut.

Lendutan balok-balok struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan, atau kondisi-kondisi ujungnya (seperti tumpuan sederhana atau ada tahanan karena kesinambungan batang), jenis pembebanan (beban terpusat ataukah beban terdistribusi), dan kekakuan lentur EI dari elemen. Dan apabila suatu balok non pratekan tidak memperhitungkan lendutan maka syarat berikut harus terpenuhi :

Tabel 2.2. Tebal minimum balok non pratekan atau plat satu arah apabila lendutan tidak dihitung.

TEBAL MINIMUM, h				
Komponen Struktur	Dua Tumpuan	Satu Ujung Menerus	Kedua Ujung Menerus	Kantilever
Komponen tidak mendukung atau menyatu dengan partisi atau kontruksi lain yang akan rusak akibat lendutan besar				
Plat Masif Satu Arah	$\frac{l}{20}$	$\frac{l}{24}$	$\frac{l}{28}$	$\frac{l}{10}$
Balok atau Plat Rusak Satu Arah	$\frac{l}{16}$	$\frac{l}{18,5}$	$\frac{l}{21}$	$\frac{l}{8}$

Sumber : Tabel 9.5 (a) SNI 03-2874-2002

Syarat umum adalah bahwa baik ketepatan maupun untuk kerja suatu kontruksi tidak boleh terganggu oleh lendutan yang terjadi sehingga terdapat lendutan ijin maksimum yang harus terjadi berdasarkan pada komponen struktur sehingga dalam SNI 03-2874-2002 diatur sebagai berikut :

Tabel 2.3. Lendutan Ijin Maksimum

TIPE KOMPONEN STRUKTUR	LENDUTAN YANG DIPERHITUNGGAN	BATAS LENDUTAN
Atap datar tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup L	$\frac{l}{180}$
Lantai tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup L	$\frac{l}{360}$
Kontruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban yang bekerja dan lendutan seketika yang terjadi akibat penambahan sembarang beban hidup	$\frac{l}{480}$
Kontruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak rusak akibat lendutan yang besar		$\frac{l}{240}$

Sumber : Tabel 9.5. (b) SNI 03-2847-2002

2.6.1. Persamaan Lendutan

Secara umum persamaan lendutan pada balok elastis dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\delta_{maks} = \beta_a \frac{ML^2}{EI_e} \quad (2-14)$$

Dimana :

β_a = suatu koefisien yang tergantung pada tumpuan dan kondisi pembebanan

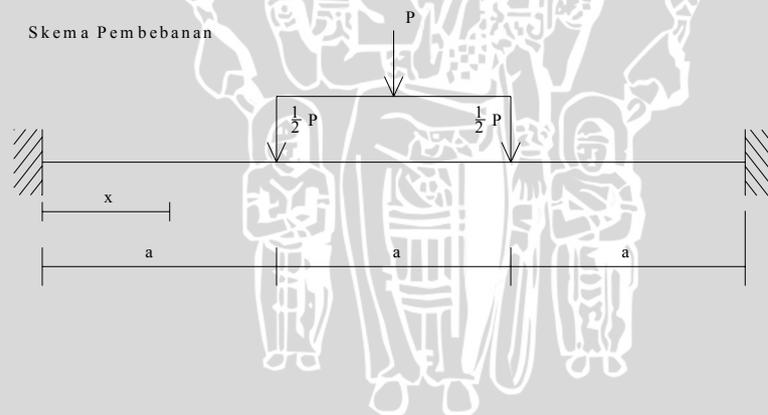
M = momen yang bekerja pada penampang

E_c = modulus elastis beton

I_e = momen inersia efektif

L = panjang bentang

Adapun menurut Mac Gregor, persamaan lendutan didefinisikan sebagai berikut menurut jenis pembebanan dan tumpuan yang mendukung struktur balok beton seperti pada gambar gambar 2.9. :



Gambar 2.9. Kondisi pembebanan struktur balok

Sumber : Mac Gregor

$$\delta_{maks} \text{ (ditengah bentang)} = \frac{5 \cdot pl^3}{684EI} \quad (2-15)$$

Balok yang mempunyai tulangan tekan dapat diperlakukan seperti pada balok bertulangan tunggal, kecuali dalam hal adanya kontribusi tulangan tekan terhadap kekakuan balok, sebab adanya tulangan tekan ini sangat memperbesar kekakuan balok. Sebagai momen inersia penampang tak retak I_g dapat digunakan tanpa kehilangan ketelitian. Kontribusi tulangan tekan A_s' terhadap momen inersia penampang retak I_{cr} harus diperhitungkan.

$$A_s \cdot f_s = b y \frac{f_c}{2} - A_s' f_c \frac{y - d'}{y} + A_s' f_s' \quad (2-16)$$

Persamaan untuk menghitung nilai y untuk balok dengan tulangan tekan :

$$\frac{b y^2}{3} + [n \cdot A_s + (n - 1) A_s'] y - n \cdot A_s \cdot d - (n - 1) A_s' \cdot d' = 0 \quad (2-17)$$

Momen inersia I_{cr} penampang retak dapat ditulis sebagai berikut :

$$I_{cr} = \frac{b y^3}{3} + n \cdot A_s (d - y)^2 + (n - 1) A_s' (y - d')^2 \quad (2-18)$$

2.6.2. Modulus Elastisitas

Seperti diketahui, beton bertulang terdiri dari bahan beton yang diberi penguat yang terdiri dari tulangan baja. Dengan demikian terdapat dua unsur bahan utama yang berbeda sifatnya, membentuk mekanisme kerjasama struktural di dalam komponen. Susunan bahan yang demikian dinamakan komposit. Teori balok yang umumnya memisalkan modulus yang sama di dalam tarik dan tekan untuk bahan yang homogen.

$$E_c = 0.043 \cdot w_c^{1.5} \sqrt{f'c} \quad \text{untuk beton dengan berat isi antara } 1500\text{-}2500 \text{ kg/m}^3$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} \quad \text{untuk beton berbobot normal } 2200\text{-}2500 \text{ kg/m}^3$$

Dimana : E_c = modulus elastisitas beton tekan (Mpa)

W_c = berat isi beton (kg/m^3)

f'_c = kuat tekan beton (Mpa)

Perbandingan modulus bahan baja terhadap beton disebut juga angka ekuivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c}, \quad E_s = 29 \times 10^6 \text{ .psi (200.000 Mpa)}$$

2.6.3. Momen Inersia

Pedoman pengendalian lendutan terdapat pada SNI 03-2847-2002 pasal 9.1.2. Teori yang digunakan yaitu pemeriksaan lendutan didasarkan atas perilaku bahan pada strata beban kerja (layan). Pada strata beban layan pada awalnya komponen struktur beton terlentur masih menampilkan perilaku elastis tetapi kemudian mengalami retak di daerah tarik pada saat momen yang bekerja sedemikian besar sehingga timbulnya regangan tarik yang melampaui kuat tarik beton.

Momen inersia penampang retak merupakan batas ekstrim minimum dari rentang nilai yang digunakan untuk memperhitungkan besarnya lendutan. Sebagai batas lawannya, dimana penampang masih mampu untuk bertahan terhadap lendutan, ialah momen inersia keadaan penampang utuh tanpa retak. Pada kenyataannya I_{cr} dan I_g terdapat bersamaan dalam suatu komponen struktur terlentur dimana momen maksimum yang bekerja melampaui batas momen retak.

Hasil penelitian Bronson menunjukkan bahwa nilai momen inersia realistik untuk perhtiungan lendutan terletak diantara kedua batas ekstrim tersebut, dimana momen inersia efektif bernilai :

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{maks}} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{maks}} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (2-19)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

$$I_e = I_{cr} + \left(\frac{M_{cr}}{M_{maks}} \right)^3 (I_g - I_{cr}) \leq I_g \quad (2-20)$$

$$I_{cr} < I_e < I_g \quad (2-21)$$

Dengan demikian nilai momen inersia efektif tergantung pada nilai kedua pembatasnya, momen inersia penampang retak dan momen inersia penampang utuh, dimana:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} = \text{momen retak} \quad (2-22)$$

I_g = momen inersia dari penampang bruto beton yang tidak retak, terhadap sumbu pusat, dengan mengabaikan tulangan.

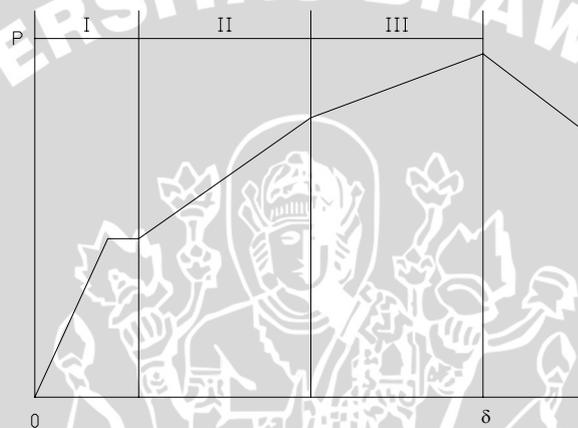
$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (2-23)$$

f_r = modulus runtuh beton. $f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$

y_t = jarak dari garis netral terhadap serat tarik ekstrim. $y_t = \frac{h}{2}$

2.7. Perilaku Defleksi pada Balok

Perilaku balok yang dibebani hingga runtuh dinyatakan dengan kurva hubungan antara beban dengan lendutan.



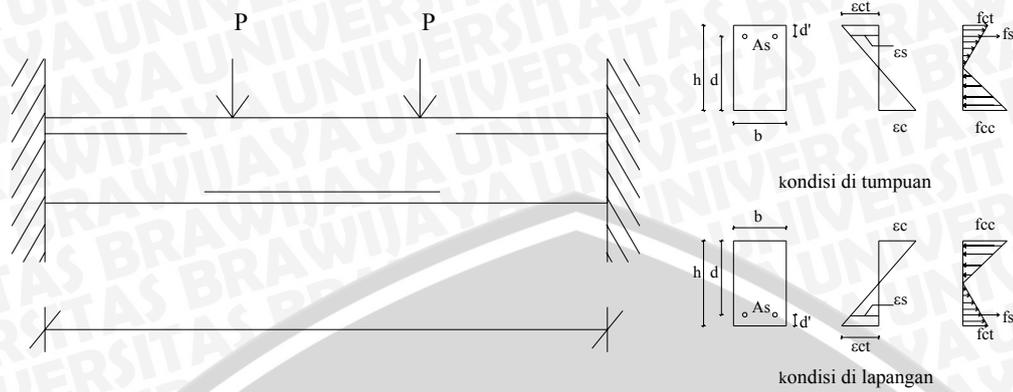
Gambar 2.10. Grafik Hubungan Beban (P) dengan Lendutan (δ) Balok Beton Bertulang yang Didapat dari Hasil Pengamatan.

Sumber : Nawy, E. G, 1990 : 256

Tarif keruntuhan menurut Grafik terbagi atas:

2.7.1. Taraf Praretak (Daerah I)

Pada daerah ini batang-batang struktural bebas retak. Kurva beban-lendutan pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah ini lebih kecil dari pada kekuatan tariknya akibat lentur dan besarnya berbanding lurus dengan regangan yang terjadi. Pada pembebanan yang terjadi, selama tegangan tarik maksimum beton lebih kecil dari modulus kehancuran (f_r), maka seluruh beton dapat dikatakan efektif dalam memikul tegangan.

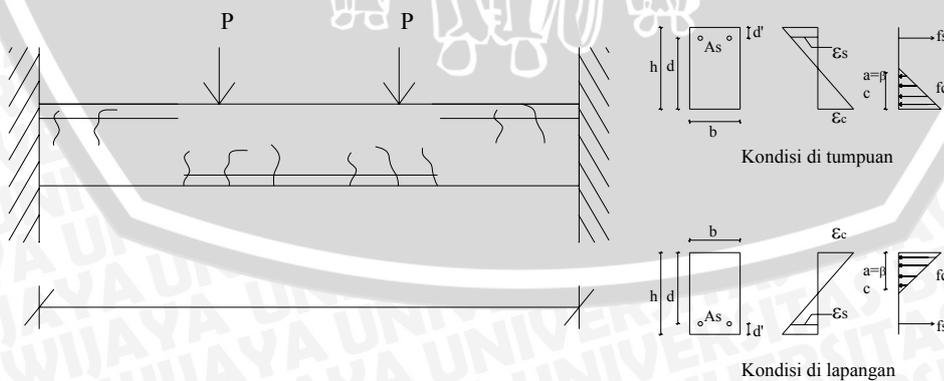


Gambar 2.11. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Praretak.

Sumber : Winter, 1993 hal. 49

2.7.2. Taraf Beban Pasca retak (Daerah II)

Apabila beban ditambah terus, maka kekuatan tarik beton akan segera tercapai dan mulai terjadi retak-retak akibat tarik yang menjalar keatas sampai mendekati garis netral. Garis netral tersebut kemudian bergeser keatas diikuti dengan menjalarnya retak-retak. Apabila sudah terjadi retak lentur, kontribusi kekuatan tarik beton dikatakan sudah tidak ada lagi. Ini berarti kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban-penurunan didaerah ini semakin landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada taraf ini tegangan beton tidak mencapai kurang lebih sebesar $0.5 f'_c$, maka hubungan antara tegangan dan regangan akan terus berlangsung mendekati hubungan yang berbanding lurus.



Gambar 2.12. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Balok Taraf Pasca Retak.

Sumber : Winter, 1993 hal. 49



Karena tegangan baja $f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$ dan tegangan beton $f_c = E_c \cdot \varepsilon_c$ maka persamaan di atas ditulis sebagai :

$$A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s = \frac{bc}{2} \cdot E_c \cdot \varepsilon_c \quad (2-24)$$

Dan segitiga sebangun di atas :

$$\frac{\varepsilon_c}{y} = \frac{\varepsilon_s}{d-y} \text{ atau } \varepsilon_s = \varepsilon_c \left(\frac{d}{y} - 1 \right) \quad (2-25)$$

Substitusi dari dua persamaan di atas adalah :

$$A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_c \left(\frac{d}{y} - 1 \right) = \frac{b \cdot y}{2} \cdot E_c \cdot \varepsilon_c \text{ atau}$$

$$\frac{A_s \cdot E_s}{E_c} \left(\frac{d}{y} - 1 \right) = \frac{b \cdot y}{2} \quad (2-26)$$

Dimana $n = \frac{E_s}{E_c}$ maka persamaan menjadi :

$$\frac{by^2}{2} + n \cdot A_s \cdot y - n \cdot A_s \cdot d = 0 \quad (2-27)$$

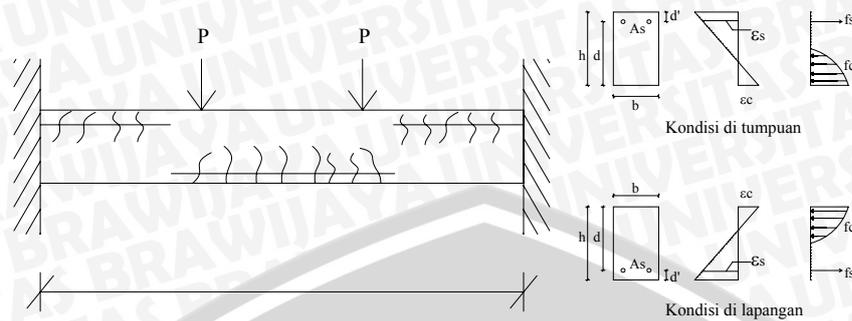
Sehingga besarnya y-pun dapat diperoleh dari persamaan di atas.

Momen inersia I_{cr} dapat diperoleh dari :

$$I_{cr} = \frac{by^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (d - y)^2, \text{ (tulangan tunggal)} \quad (2-28)$$

2.7.3. Taraf Retak Pasca – Serviceability dan Keadaan Limit (daerah III)

Diagram beban-penurunan pada daerah III jauh lebih datar dari pada daerah I dan II yang diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang sudah cukup banyak dan lebar disepanjang bentang. Apabila beban terus bertambah tegangan dan regangan juga akan naik dan hubungan antara keduanya tidak lagi berbanding lurus. Regangan tulangan baja ε_s , pada sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ε_y . Balok yang tulangan tariknya mulai leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini terus menerus mengalami defleksi, retaknya semakin terbuka sehingga garis netralnya mendekati serat tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan yang dapat mengakibatkan kehancuran total beton pada daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya kehancuran.



Gambar 2.13. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Taraf Balok Serviceability.

Sumber : Winter, 1993 hal. 49

2.8. Lendutan Seketika dan Lendutan Jangka Panjang pada Balok

2.8.1 Lendutan Seketika pada Balok

Lendutan seketika pada komponen struktur terjadi apabila segera setelah beban bekerja, seketika itu pula terjadi lendutan. Untuk memperhitungkannya, komponen struktur dianggap berperilaku elastis. Lendutan komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung (bentang sederhana, menerus, atau jepit), jenis beban (terpusat,merata) dan kekakuan lentur komponen (EI).

Lendutan maksimum adalah :

$$\delta_{maks} = \beta_a \frac{ML^2}{EI_e} \quad (2-29)$$

dimana, β_a = tetapan yang tergantung kepada pembebanan dan kondisi perletakan.

M = momen yang bekerja pada penampang

L = panjang bentang

I_e = momen inersia efektif

2.8.2. Lendutan Jangka Panjang pada Balok

Pada komponen struktur beton bertulang, disamping terjadi lendutan seketika akan mengalami pula lendutan yang timbul secara berangsur-angsur

dalam jangka waktu yang cukup lama. Lendutan tersebut terutama disebabkan oleh sifat dan perilaku rayapan dan susut pada beton, yang mengakibatkan bertambahnya regangan.

Dengan sendirinya bertambahnya regangan yang mengakibatkan perubahan distribusi tegangan pada beton dan tulangan baja sehingga lendutan juga bertambah untuk beban yang bersifat menetap. Selanjutnya, lendutan tersebut dinamakan lendutan berjangka panjang dan dihitung berdasarkan atas dua hal, yaitu :

1. Besarnya beban mati dan beban hidup yang menetap
2. Rasio perbandingan tulangan tekan dan tarik pada balok.

Nilai lendutan dinyatakan dalam perkalian suatu faktor dengan lendutan seketika yang disebabkan oleh beban menetap :

$$\Delta_{LT} = \Delta_i \lambda \left[\frac{\xi}{1 + 50\rho'} \right] \quad (2-30)$$

dimana :

Δ_{LT} = lendutan jangka panjang

Δ_i = lendutan seketika disebabkan oleh beban yang menetap

ξ = konstanta ketergantungan waktu untuk beban tetap, ditetapkan sebagai berikut :

untuk 5 tahun atau lebih (∞) = 2,0

12 bulan = 1,4

6 bulan = 1,2

3 bulan = 1,0

ρ' = A_s/bd , rasio penulangan tekan komponen non pratekan, adalah nilai ditengah bentang untuk balok dua tumpuan dan menerus, pada tumpuan untuk kantilever.

Karena beban hidup tidak selalu bekerja disepanjang waktu, yang diperhitungkan hanya sebagian yang dianggap sebagai beban menetap. Disamping beban mati yang memang bersifat permanen. Sehingga lendutan total jangka panjang diperhitungkan sebagai berikut :

$$\Delta_{LT} = \Delta_{LL} + \lambda(\infty)\Delta_{DL} + \lambda(t)\Delta_{SL} \quad (2-31)$$

- dimana,
- Δ_{LL} = lendutan seketika akibat beban hidup
 - Δ_{DL} = lendutan seketika akibat beban mati
 - Δ_{SL} = lendutan akibat sebagian beban hidup yang menetap, nilainya tergantung pada besar dan lama waktu bekerjanya
 - $\lambda(\infty)$ = faktor pengali untuk beban menetap selama tak terhingga
 - $\lambda(t)$ = faktor pengali untuk menetap dalam waktu tertentu

2.9. Hipotesis Penelitian

Hipotesis dari penelitian ini adalah :

1. Terdapat pengaruh dari perpanjangan tulangan tumpuan yang diteruskan ke daerah lapangan terhadap lendutan balok.
2. Besarnya lendutan juga dipengaruhi oleh adanya perpanjangan tulangan tumpuan yang diteruskan ke lapangan.