

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Beton bertulang merupakan material yang terdiri dari beton dan baja. Sifat kedua bahan ini sebenarnya cukup berbeda. Beberapa perbedaannya dapat ditinjau sebagai berikut :

Pembanding	Beton	Baja
kekuatan tarik	jelek	bagus
kekuatan tekan	bagus	bagus, tetapi batang yang langsing akan melekok
kekuatan geser	cukup	bagus
keawetan	bagus	berkarat bila tidak terlindung
katahanan dalam kebakaran	bagus	jelek-menderita kehilangan kekuatan secara cepat pada temperatur tinggi

Tabel 2.1 Beberapa perbedaan sifat beton dengan baja
(W.H.Mosley,1984)

Apabila sifat-sifat terbaik dari baja maupun beton dikombinasikan, diharapkan akan membentuk suatu bahan bangunan yang kuat, tahan lama, serta mudah dibentuk dalam berbagai rupa dan ukuran. Inilah yang kemudian kita kenal dengan istilah beton bertulang. Pengkombinasian ini diharapkan dapat menghasilkan kekuatan tarik beton, dimana besarnya sekitar 10%-15% dari kuat tekannya (Chu-Kia Wang,1986)

Oleh karena itu hampir semua konstruksi beton bertulang direncanakan dengan anggapan bahwa beton tidak memikul gaya tarik. Tulanganlah yang direncanakan untuk memikul gaya tarik tersebut. Kerjasama antara bahan beton dengan tulangan baja ini hanya dapat terwujud pada keadaan; (1) lekatan

sempurna antara batang tulangan baja dengan beton keras yang membungkusnya. Apabila pelekatan ini tidak mencukupi, batang tulangan akan tergelincir di dalam beton dan disitu tidak terjadi aksi komposit (*composite action*) antara beton dan tulangan baja; (2) beton yang mengelilingi batang tulangan baja bersifat kedap sehingga mampu melindungi dan mencegah terjadinya karat baja; (3) angka muai kedua bahan hampir sama, dimana setiap kenaikan suhu satu derajat Celcius, angka muai beton berkisar antara 0,000010 sampai 0,000013 sedangkan baja 0,000012, sehingga tegangan yang timbul karena perbedaan nilai dapat diabaikan (Istimawan,1994).

2.2 Perilaku Sifat dan Karakteristik Beton Bertulang

Beberapa sifat beton bertulang, antara lain :

a. Kuat Tekan (f_c)

Kuat tekan beton ditentukan dengan melakukan uji kegagalan terhadap silinder beton ukuran 15 cmx 30 cm, yang berumur 28 hari pada tingkat pembebanan tertentu. Pengujian bentuk silinder ini, menghasilkan kuat tekan yang besarnya sekitar 80% dari nilai yang diperoleh dari pengujian beton uji kubus berukuran 150 mmx150 mm, dan 83% dari pengujian kuat kubus 200 mmx200 mm.

Kuat tekan ini dinyatakan dengan f_c dengan satuan N/m atau MPa (Mega Pascal). Disini f_c merupakan tegangan maksimum yang terjadi, saat regangan beton mencapai nilai $\pm 0,002$. Sedangkan Regangan ultimat pada saat hancurnya beton berkisar $\pm 0.003-0.004$. Kuat tekan beton umur 28 hari berkisar antara nilai $\pm 10-65$ Mpa.

b. Kekuatan Tarik (f_{ct}')

Nilai kuat tarik beton normal berkisar :

- 8%-15% dari kuat tekannya (Jack C.McCormac, 2003)
- 9%-15% dari kuat tekannya (Istimawan,1994)
- 10%-15% dari kuat tekannya (Chu-Kia Wang,1986)
- 10%-20% dari kuat tekannya (Edward G.Nawy,1998)

Kuat tarik beton, memegang peranan dalam berbagai hal. Terjadinya dan menjalarnya retak-retak pada bagian tarik dari batang lentur beton bertulang terutama sekali tergantung pada kekuatan tarik beton. Untuk menentukan kekuatan tarik yang sebenarnya, dalam percobaan dijumpai banyak sekali kesukaran. Kesalahan-kesalahan kecil yang terjadi dalam pengujian dan konsentrasi tegangan pada alat sering mengacaukan hasil percobaan (George Winter dan Arthur H.Nilson,1993).

Kuat tarik beton yang tepat sulit untuk diukur. Suatu pendekatan umum dilakukan dengan menggunakan *modulus of rupture*, adalah tegangan tarik lentur beton yang timbul pada pengujian hancur beton polos (tanpa tulangan), sebagai pengukur kuat tarik sesuai teori elastisitas. Kuat tarik beton juga ditentukan melalui *pengujian split cilinder* yang umumnya memberikan hasil yang lebih baik dan lebih mencerminkan kuat tarik yang sebenarnya (Istimawan,1994)

c. Kuat Geser

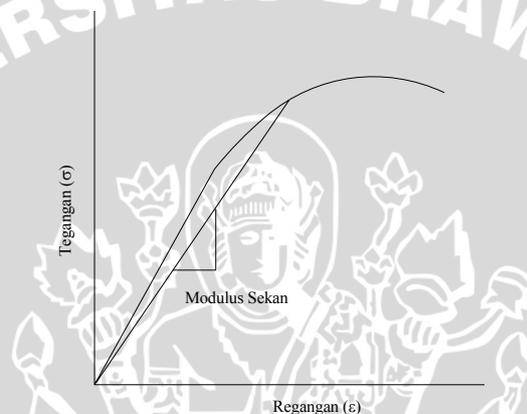
Kekuatan geser beton adalah besar, bervariasi antara 35-80% dari kekuatan tekan. Dalam pengujian, sulit untuk membedakan geser dari tegangan-tegangan lainnya dan oleh sebab itu menimbulkan beberapa variasi yang dilaporkan. Nilai -nilai yang lebih rendah menyatakan usaha-usaha untuk memisahkan pengaruh-pengaruh gesekan dari geseran-geseran sebenarnya. Nilai geser biasanya harus dibatasi sampai ke nilai-nilai yang jauh lebih rendah supaya dapat melindungi beton terhadap tegangan-tegangan tarik diagonal (Phil M.Ferguson,1991)

d. Modulus Elastisitas

Beton tidak memiliki modulus elastisitas yang pasti. Nilainya bervariasi tergantung umur beton, kekuatan beton, jenis pembebanan, fas, temperatur dan kelembaban benda uji beton. Modulus Elastisitas sekan atau modulus elastisitas statik adalah kemiringan suatu garis

lurus yang ditarik dari titik asal kurva ke suatu titik dengan harga tegangan yaitu sekitar $0,4 f_c$ (Edward G, Nawy, 1998).

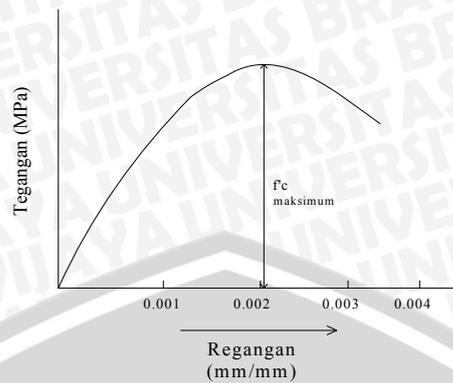
Harga ini pada perhitungan desain disebut *modulus elastisitas* (SNI 03-2847-2002 pasal 10.5 ayat 1 menyebutkan nilai modulus elastisitas untuk beton normal, E_c dapat diambil sebesar $(4700)\sqrt{f'c}$. Untuk nilai w_c diantara 1500 kg/m^3 dan 2500 kg/m^3 nilai modulus elastisitas beton E_c dapat diambil sebesar $(w_c)^{1,5} 0,043\sqrt{f'c}$ (dalam MPa).



Gambar 2.1 Modulus elastisitas Beton

e. Kurva Tegangan-Regangan

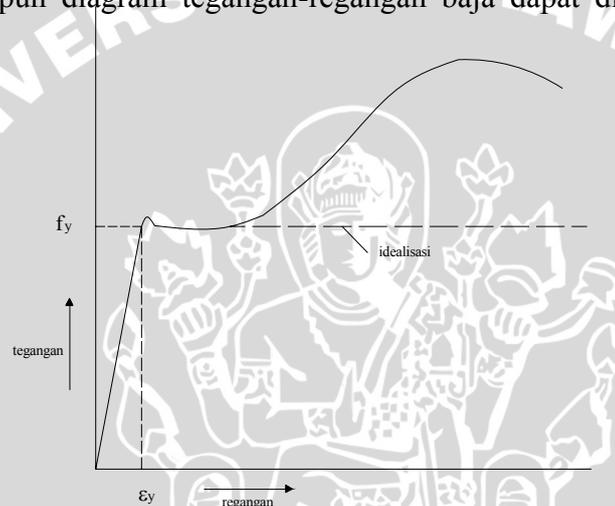
Kurva-tegangan regangan pada gambar 2.2 menampilkan hasil yang dicapai dari uji kompresi terhadap sejumlah silinder uji standar umur 28 hari. Kuat tekan maksimum tercapai ketika regangan mencapai $\pm 0,002$. Selanjutnya nilai tegangan akan turun dengan bertambahnya nilai regangan sampai benda uji hancur pada nilai ε' mencapai $0,003-0,005$. Bagian pertama dari setiap kurva hampir merupakan suatu garis lurus, tapi terdapat lengkungan setelah f_c mencapai separuh dari nilai maksimum (Phil M. Ferguson, 1991).



Gambar 2.2 Gambar diagram tegangan-regangan beton
(Istimawan,1994)

Adapun diagram tegangan-regangan baja dapat dilihat pada gambar

2.3



Gambar 2.3 Gambar diagram tegangan-regangan baja
(Istimawan,1994)

Pada bagian awal diagram ini, hubungan tegangan-regangan baja berbentuk linear. Kemudian terdapat bagian yang hampir horisontal yang dikenal sebagai batas leleh dimana regangan bertambah sedangkan tegangan boleh dikatakan konstan. Tegangan ini disebut tegangan leleh baja. Setelah terjadi pelelehan, garis kurva naik lagi dan melewati titik maksimum (tegangan ultimit), kemudian turun ke suatu nilai tegangan yang lebih rendah dimana batang akan putus (Vis dan Gideon Kusuma, 1993).

2.3. Lentur pada balok

Pada setiap penampang balok, terdapat gaya-gaya dalam yang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Komponen-komponen yang tegak lurus terhadap penampang tersebut merupakan tegangan-tegangan lentur (tarik pada satu sisi dari sumbu netral dan tekan pada sisi lainnya). Fungsi dari komponen-komponen ini adalah untuk memikul momen lentur pada penampang tersebut. Komponen-komponen yang menyinggung penampang dikenal sebagai tegangan-tegangan geser, dan komponen-komponen tersebut memikul gaya-gaya geser atau transversal (George Winter dan Arthur H.Nilson,1993).

Lentur pada balok merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena beban luar. Apabila bebannya bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan terjadinya retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila bebannya semakin bertambah, pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen. Oleh sebab itu, penampang elemen balok harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak yang berlebihan pada saat beban kerja dan masih memiliki keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan, tanpa mengalami keruntuhan (Edward G.Nawy,1998).

Berdasarkan terjadinya leleh tulangan tarik, jenis keruntuhan dapat dikelompokkan sebagai berikut :

2.3.1. Kondisi *balance*

Letak garis netral pada posisi dimana akan terjadi secara bersamaan yaitu regangan luluh pada baja tarik dan regangan beton tekan maksimum 0,003. Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya. Pada awal terjadi keruntuhan, regangan tekan yang diijinkan pada serat tepi yang tertekan adalah 0,003. Sedangkan regangan baja sama dengan regangan lelehnya. Sehingga terjadilah kehancuran beton dan tulangan baja secara bersamaan.

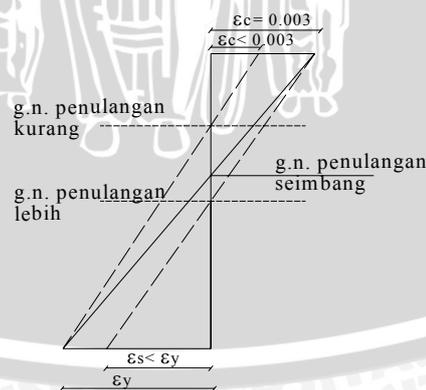
2.3.2. Kondisi *Underreinforced/tension failure*/tulangan lemah

Tulangan baja tarik akan mendahului mencapai regangan luluhnya sebelum beton mencapai regangan maksimum 0,003. Pada keadaan ini, bertambahnya beban akan mengakibatkan tulangan baja mulur (memanjang), begitu pula regangan beton maupun baja terus bertambah akan tetapi gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja tidak bertambah besar. Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*.

2.3.3. Kondisi *Over-reinforced/Compression failure*/tulangan kuat

Kondisi ini terjadi apabila jumlah tulangan baja tarik lebih banyak dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*. Berlebihnya tulangan baja tarik mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah, yang pada gilirannya mengakibatkan beton mendahului mencapai regangan maksimum 0,003 sebelum tulangan baja tariknya luluh. Apabila penampang balok diberi momen lebih besar lagi hingga kemampuan regangan beton terlampaui maka berlangsung keruntuhan dengan beton hancur mendadak tanpa gejala terlebih dahulu.

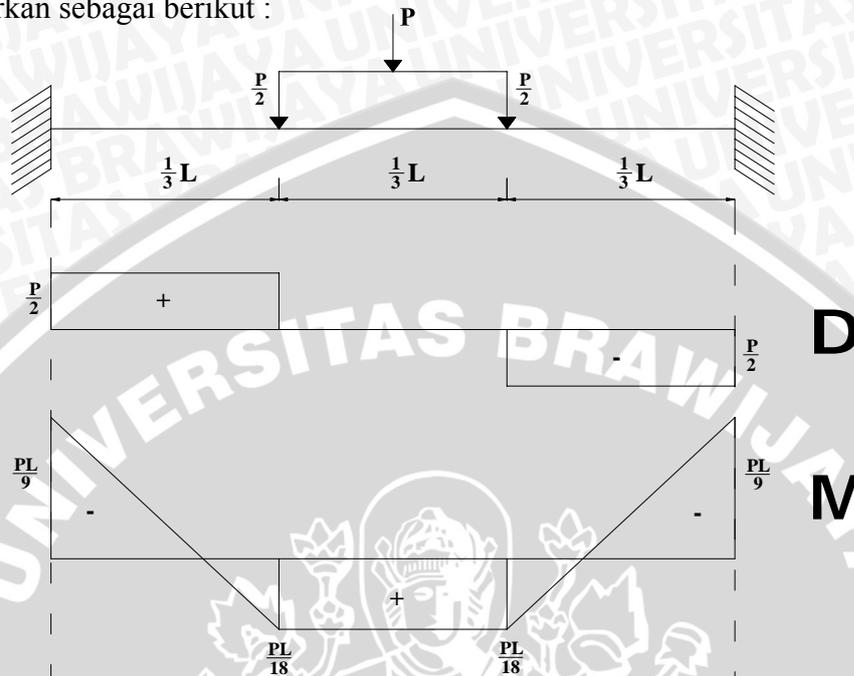
Sehingga untuk desain penampang balok hampir semua peraturan merekomendasikan dalam kondisi *Under-reinforced*, karena didahului oleh gejala-gejala peringatan awal sebelum kehancuran.



Gambar 2.4. Variasi letak garis netral

(Istimawan, 1994)

Adapun pada pengujian kuat lentur balok, dengan tumpuan jepit-jepit dengan dua beban terpusat sebesar $\frac{P}{2}$, maka diagram lintang dan momen dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.5 Diagram Lintang dan Momen Balok

Momen maksimum yang terjadi pada balok tersebut adalah :

$$M_{maks \text{ Tumpuan}} = \frac{PL}{9} \tag{2-1}$$

$$M_{maks \text{ Lapangan}} = \frac{PL}{18} \tag{2-2}$$

2.4. Beban-beban

Beban-beban yang bekerja pada struktur dapat dibagi dalam tiga kategori utama : beban mati, beban hidup, dan beban alam. Beban mati adalah beban yang besar dan letaknya adalah tetap selama masa kerja struktur.

Beban hidup dari suatu bangunan terutama terdiri dari beban manusia yang mengisinya dan untuk struktur jembatan adalah beban lalu lintas yang bergerak di atasnya. Beban ini bisa bekerja secara penuh atau sebagian atau sama sekali tidak ada dan lokasi bekerjanya juga bisa berubah-ubah.

Beban alam terdiri dari beban salju, tekan, tarik angin, beban gempa bumi, tekan tanah pada struktur dalam tanah, beban akibat adanya kolam air atau air

hujan pada atap yang rata dan gaya-gaya yang timbul akibat adanya perbedaan temperatur (George Winter dan Arthur H.Nilson, 1993).

2.5. Persyaratan Kekuatan

Struktur bangunan dan komponen-komponennya harus direncanakan untuk mampu memikul beban lebih di atas beban yang diharapkan bekerja. Kapasitas lebih tersebut disediakan untuk memperhitungkan kemungkinan terdapatnya beban kerja yang lebih besar dari yang ditetapkan dan kemungkinan terjadinya penyimpangan kekuatan komponen struktur akibat bahan dasar ataupun pengerjaan yang tidak memenuhi syarat.

Kriteria dasar kuat rencana dapat dituliskan :

Kekuatan yang tersedia > kekuatan yang dibutuhkan

Kekuatan yang dibutuhkan atau kuat perlu menurut SNI 03-2847-2002 dapat diungkapkan sebagai beban rencana ataupun momen, gaya geser, dan gaya-gaya lain yang berhubungan dengan beban rencana. Beban rencana atau beban terfaktor didapatkan dari mengalikan beban kerja dengan faktor beban dan kemudian digunakan subskrip u sebagai petunjuknya. Untuk beban hidup, SNI 03-2847-2002 pasal 9.2 ayat 1 menetapkan bahwa beban rencana, gaya geser rencana dan momen rencana ditetapkan hubungannya dengan beban kerja atau beban guna melalui persamaan sebagai berikut :

$$U = 1.2D + 1.6L \quad \text{Persamaan (3.2-1) SNI 03-2847-2002}$$

Dimana U adalah kuat rencana (kuat perlu), D adalah beban mati dan L adalah beban hidup. Faktor beban berbeda untuk beban mati, beban hidup, beban angin ataupun beban gempa. Ketentuan faktor beban untuk jenis pembebanan lainnya, tergantung kombinasi pembebanan terdapat dalam SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.2 ayat 2.3 dan ayat 4 (Istimawan,1994)

Pasal 3.2.3 memberikan ketentuan konsep keamanan kedua yaitu menggunakan faktor reduksi kekuatan (ϕ) dalam menentukan kuat rencana. Standar SNI 03-2847-2002 pasal 9.2 ayat 2, 3 dan 4 memberikan faktor reduksi kekuatan ϕ untuk berbagai mekanisme, sehingga dengan demikian dinyatakan bahwa kuat

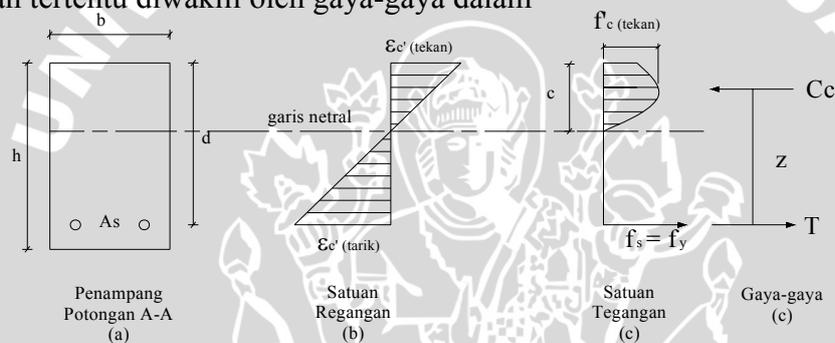
momen yang digunakan M_R (kapasitas momen) sama dengan kuat ideal M_n dikalikan dengan faktor ϕ , dapat ditulis :

$$M_R = \phi M_n \quad (2-3)$$

2.6. Analisis Kebutuhan tulangan tunggal

Suatu balok dapat memakai tulangan tunggal maupun tulangan rangkap. Pada tulangan tunggal, suatu balok hanya memakai tulangan tarik saja sedangkan pada tulangan rangkap, suatu balok memakai tulangan tarik dan tulangan tekan.

Kuat lentur suatu balok beton tersedia karena berlangsungnya mekanisme tegangan-tegangan dalam yang timbul di dalam balok yang pada keadaan tertentu diwakili oleh gaya-gaya dalam

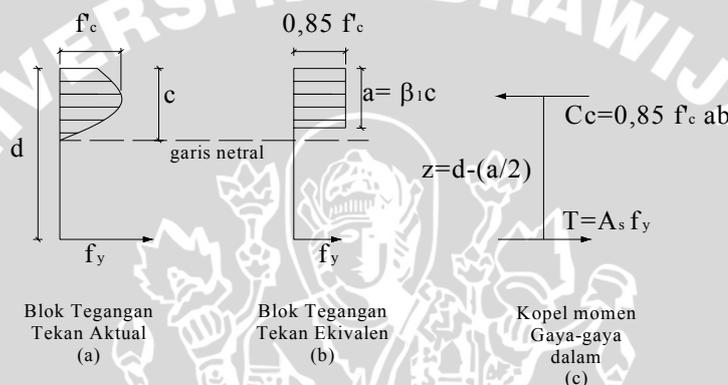


Gambar 2.6. Blok Tegangan Ekuivalen Whitney

Seperti tampak pada gambar 2.6, T adalah resultante gaya tarik dalam, merupakan jumlah seluruh gaya tarik yang diperhitungkan untuk daerah dibawah garis netral. Cc adalah resultante gaya tekan dalam, yang merupakan resultante seluruh gaya tekan pada daerah di atas garis netral. Kedua gaya ini arah garis kerjanya sejajar dan sama besar, tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak z sehingga membentuk momen kopel tahanan dalam.

Momen tahanan dalam inilah yang akan memikul momen lentur rencana aktual yang ditimbulkan oleh beban luar. Untuk menentukan momen tahanan dalam, yang penting adalah mengetahui terlebih dahulu nilai Cc dan letak garis kerja gaya dihitung terhadap serat tekan terluar, sehingga jarak z dapat dihitung. Kedua nilai tersebut dapat ditentukan melalui penyederhanaan bentuk distribusi lengkung digantikan dengan bentuk ekuivalen yang sederhana, dengan menggunakan nilai intensitas tegangan rata-rata sedemikian rupa sehingga nilai dan letak resultan tidak berubah.

Distribusi tegangan tekan aktual yang terjadi pada penampang mempunyai bentuk parabola seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.5 (c). Menghitung volume blok tegangan tekan yang berbentuk parabola bukanlah hal yang mudah. Karena itu, untuk tujuan penyederhanaan Whitney telah mengusulkan bentuk persegi panjang sebagai distribusi tegangan beton tekan ekivalen. Dengan menggunakan distribusi tegangan untuk persegi empat ekivalen serta anggapan-anggapan kuat rencana yang diberlakukan, dapat ditentukan besarnya kuat lentur ideal M_n dari balok beton bertulang empat persegi bertulangan tarik saja.



Gambar 2.7 Blok Tegangan Ekivalen Whitney

Berdasarkan bentuk empat persegi panjang, seperti tampak pada Gambar 2.7 intensitas tegangan beton tekan rata-rata ditentukan sebesar 0,85 dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang balok selebar b dan sedalam a , yang mana besarnya ditentukan dengan rumus :

$$a = \beta c \tag{2-4}$$

dengan c = Jarak serat tekan terluar ke garis netral

β = Konstanta yang merupakan fungsi dari kelas kuat tekan beton.

Standar SNI 03-2847-2002 menetapkan nilai β diambil 0,85 untuk $f_c' < 30$ MPa, berkurang 0,008 untuk setiap kenaikan 1 MPa kuat tekan beton dan nilai tersebut tidak boleh kurang dari 0,65 (Istimawan,1994).

Dengan menggunakan anggapan bahwa baja tarik telah mencapai tegangan luluh (f_y), kemudian harus diperiksa sebagai berikut :



Gaya tekan beton

$$C_c = 0,85 f_c ab \quad (2-5)$$

Gaya tarik baja tulangan, dengan asumsi baja tarik leleh

$$T = A_s f_y \quad (2-6)$$

Keseimbangan gaya (gaya tekan = gaya tarik)

$$C_c = T \quad (2-7)$$

$$0,85 f_c ab = A_s f_y \quad (2-8)$$

$$\leftarrow a = \frac{A_s f_y}{(0,85 f_c') b} \quad (2-9)$$

$$M_n = T (d - a/2) \quad (2-10)$$

Dengan :

C_c = resultante gaya tekan (kN)

T = resultante gaya tarik (kN)

f_c = tegangan tekan beton (MPa)

f_y = tegangan luluh baja (MPa)

M_n = momen nominal (kNm)

2.7. Analisis kebutuhan tulangan rangkap untuk balok

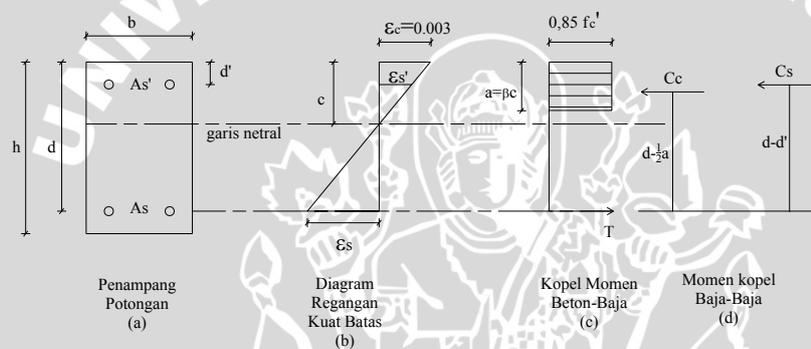
Balok yang mempunyai tulangan tekan dan tulangan tarik disebut balok bertulangan rangkap. Tulangan tekan umumnya tidak diperlukan pada penampang yang didesain dengan metode kekuatan karena penggunaan kuat tekan pada beton secara penuh jelas akan mengurangi kebutuhan akan tulangan tekan, dibandingkan desain yang dibuat berdasarkan metode desain tegangan kerja.

Meskipun demikian, kadang-kadang balok harus berukuran kecil karena persyaratan ruang atau arsitektur sehingga tulangan tekan juga diperlukan disamping tulangan tarik. Tulangan tekan tidak hanya meningkatkan kemampuan menahan momen penahan penampang beton, tetapi juga meningkatkan jumlah lekukan (curvature) yang dapat ditahan suatu balok sebelum kegagalan lentur terjadi. Ini berarti daktilitas penampang dengan tulangan tekan semakin meningkat (Jack C.McCormac,2002).

George Winter menyatakan bahwa tulangan tekan akan mengurangi lendutan jangka panjang yang terjadi pada batang. Disamping itu, pada beberapa kasus tertentu, tulangan akan ditempatkan pada daerah tekan untuk memikul momen minimum atau sebagai pendukung sengkang yang ditempatkan menerus sepanjang batang.

MacGregor menyatakan 4 alasan dalam penggunaan tulangan tekan yaitu untuk mengurangi lendutan jangka panjang, menambah daktilitas, mengubah mode keruntuhan dari *compression* ke *tension failure*, dan kemudahan fabrikasi.

Kuat momen dari pasangan kopel tulangan baja tekan dan baja tarik tambahan dihitung sebagai berikut :



Gambar 2.8 Analisa Balok Bertulang Rangkap

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

$$f_s = f_s' = f_y \quad (2-11)$$

Keseimbangan gaya-gaya : $\Sigma(H) = 0$

$$T = C_c + C_s \quad (2-12)$$

$$A_s f_y = 0,85 f_c' a b + A_s' f_y$$

Nilai a didapatkan dari persamaan berikut :

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{(0,85 f_c' b)} \quad (2-13)$$

letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan-regangan tulangan baja.

$$c = \frac{a}{0,85} \quad (2-14)$$

dilakukannya pengecekan regangan adalah untuk mengetahui apakah asumsi awal yang digunakan benar, (apakah tulangan tekan maupun tarik telah meluluh sebelum beton hancur ataukah belum).

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

$$\epsilon_s' = \left(\frac{d'-c}{c} \right) 0,003 \tag{2-15}$$

$$\epsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) 0,003 \tag{2-16}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \tag{2-17}$$

Apabila $\epsilon_s' < \epsilon_y$ dan $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ untuk mendapatkan nilai α digunakan persamaan sebagai berikut:

$$A_s f_y = (0,85 f'_c)ab + A_s' f_s' \tag{2-18}$$

$$f_s' = 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) E_s \tag{2-19}$$

$$f_s' = 0,003 \left(1 - \frac{\beta \cdot d'}{a} \right) E_s \tag{2-20}$$

$$A_s f_y = (0,85 f'_c)ab + A_s' 0,003 \left(1 - \frac{\beta \cdot d'}{a} \right) E_s \tag{2-21}$$

Menghitung kuat momen tahanan ideal untuk masing-masing kopel :

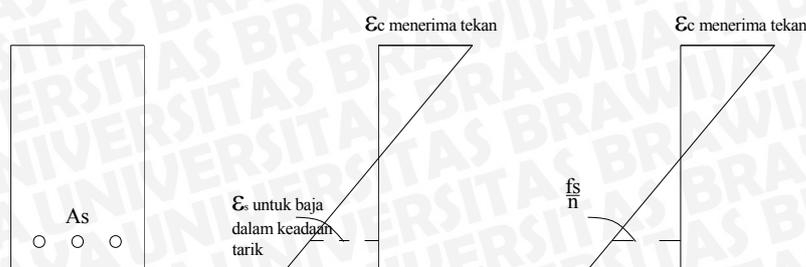
$$M_n = C_c \cdot (d - \frac{1}{2} a) + C_s \cdot (d - d') \tag{2-22}$$

2.8. Perilaku Keruntuhan Balok

Sebelum balok mengalami keruntuhan, kita dapatkan balok mengalami tiga tahapan, yaitu tahap beton tanpa retak, tahap beton mulai retak-tegangan elastis, tahap keruntuhan balok-tegangan ultimit (McCormac,2002).

2.8.1. Tahap beton tanpa retak

Pada beban yang masih kecil, ketika tegangan tarik masih lebih rendah dari modulus keruntuhan (tegangan tarik lentur pada saat beton mulai retak), seluruh penampang melintang balok menahan lentur, dengan tekan pada satu sisi dan tarik pada sisi lain (McCormac,2002).

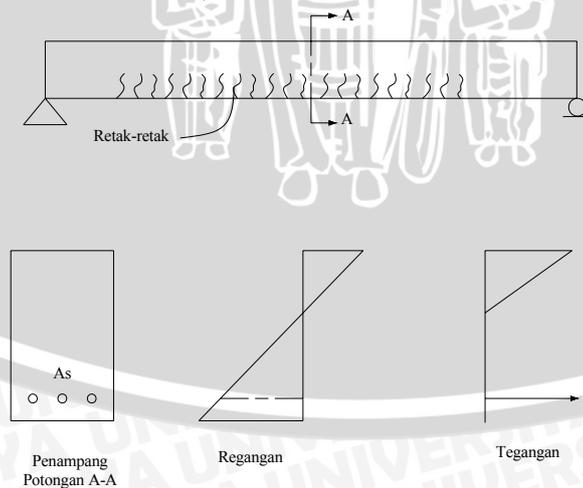


Gambar 2.9 Tahap beton tanpa retak
(Jack McCormac, 2002)

2.8.2. Tahap beton mulai retak

Karena beban terus ditingkatkan melampaui modulus keruntuhan balok, retak mulai terjadi di bagian bawah balok. Momen pada saat retak ini mulai terbentuk yaitu ketika tegangan tarik dibagian bawah balok sama dengan modulus keruntuhan disebut momen retak, M_{cr} . Jika beban terus ditingkatkan, retak ini mulai menyebar mendekati sumbu netral. Retak terjadi pada tempat-tempat di sepanjang balok dimana momen aktualnya lebih besar daripada momen retak.

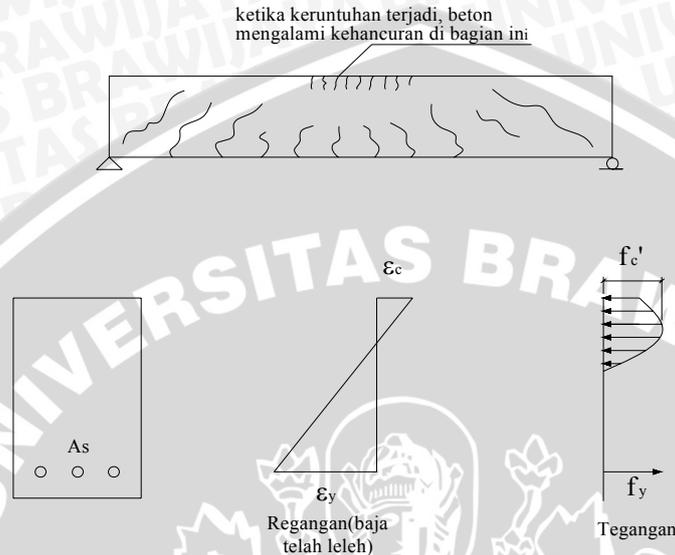
Karena beton pada daerah yang mengalami retak tersebut jelas tidak dapat menahan tegangan tarik-bajalah yang harus melakukannya. Tahap ini akan terus berlanjut selama tegangan tekan pada serat bagian atas lebih kecil daripada setengah dari kuat tekan beton f_c dan selama tegangan baja lebih kecil daripada titik lelehnya ((McCormac,2002).



Gambar 2.10 Beton mulai retak
(Jack McCormac, 2002)

2.8.3. Tahap Keruntuhan Balok

Ketika beban terus ditambah sampai tegangan tekan lebih besar dari setengah f_c , retak tarik akan merambat lebih ke atas, demikian pula sumbu netral, sehingga tegangan beton tidak berbentuk garis lurus lagi. Apabila kapasitas batas kekuatan beton terlampaui dan tulangan baja mulai leleh, balok mengalami hancur.



Gambar 2.11 Tahap tegangan ultimat
(Jack McCormac, 2002)

2.9. Momen retak

Tegangan beton di semua titik yang berjarak y dari sentroid penampang melintang dapat ditentukan dari rumus lentur berikut ini :

$$f = \frac{My}{I_g} \tag{2-23}$$

dengan :

M = momen lentur, yang besarnya sama dengan atau lebih kecil daripada momen retak penampang

I_g = momen inersia kotor dari penampang melintang

SNI 03-2847-2002 pasal 11.5 ayat 2(3) menyatakan momen retak suatu penampang dapat ditentukan dengan rumus :

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \tag{2-24}$$

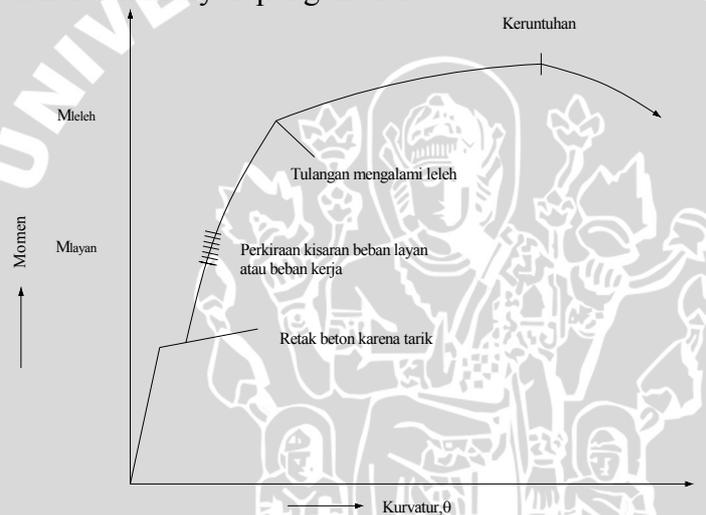
dengan :

f_r = modulus keruntuhan beton (untuk satuan SI dengan f_c dalam MPa,
 $f_r = 0,7\sqrt{f'_c}$)

y_t = jarak dari sumbu sentroid penampang ke serat beton yang mengalami tarik yang paling besar

2.10. Hubungan Momen dan *curvatur* (kelengkungan)

Tahap pertama diagram adalah untuk momen-momen kecil yang lebih kecil daripada momen retak M_{cr} dimana seluruh penampang melintang balok mampu menahan lentur. Pada kisaran ini, regangan yang terjadi kecil dan diagram hampir vertikal dan menyerupai garis lurus.



Gambar 2. 12 Diagram momen-kurvatur untuk balok beton bertulang yang mengalami tarik (McCormac, Jack ,2002)

Ketika momen bertambah hingga melebihi momen retak, kemiringan kurva akan sedikit berkurang karena balok tidak cukup kaku seperti pada tahap awal sebelum beton mulai retak. Diagram akan mengikuti garis yang hampir lurus dari M_{cr} hingga ke titik dimana tulangan mengalami tegangan sampai titik lelehnya. Agar tulangan baja meleleh, diperlukan beban tambahan yang cukup besar untuk meningkatkan lendutan balok. Setelah tulangan meleleh, balok memiliki kapasitas momen tambahan yang sangat kecil sehingga hanya sedikit saja beban tambahan yang diperlukan untuk secara substansial meningkatkan putaran sudut dan lendutan.

2.11. Penggolongan Keruntuhan Balok

Jenis keruntuhan balok beton bertulang tergantung pada kelangsingan suatu balok, biasanya dinyatakan sebagai a/d yaitu rasio antara bentang geser dengan tinggi efektif balok untuk beban terpusat atau L/d untuk beban terbagi rata.

Menurut Nawy, E.G (1990) keruntuhan suatu belok dapat terjadi menurut salah satu atau kombinasi dari 3 ragam keruntuhan berikut :

1. Keruntuhan lentur (flexure failure)
2. Keruntuhan tarik diagonal (diagonal tension failure)
3. Keruntuhan geser tekan dan geser tarik (shear compression failure and shear tension failure)

Jenis Balok	Ragam Keruntuhan	Kelangsingan Balok	
		Beban terpusat a/d	Beban merata L/d
Langsing	Lentur	> 5.5	> 16
Sedang / Normal	Tarik diagonal	2,5 - 6	11 - 16
Pendek	Geser tekan / tarik	1 - 2,5	1 - 5

Tabel 2.2 Pengaruh Kelangsingan Balok Terhadap Ragam Keruntuhan
(Nawy,E.G,1998)

dengan :

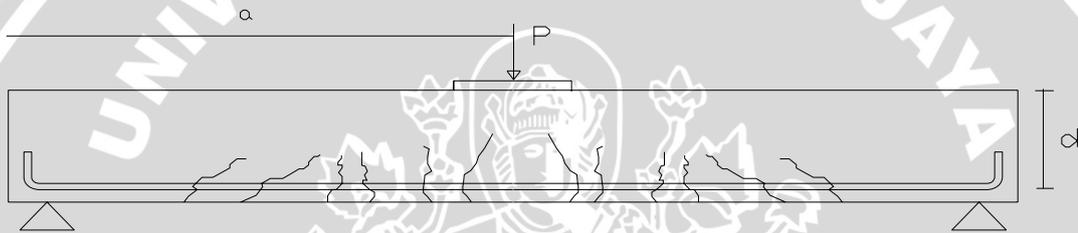
a = bentang geser (untuk beban terpusat a = jarak antara titik tangkap beban tersebut dengan muka perletakan, sedang untuk beban terdistribusi bentang gesernya sama dengan bentang bersih balok)

d = tinggi efektif balok

2.11.1 Keruntuhan Lentur

Pada keruntuhan jenis ini, terjadi retak dengan arah vertikal terutama terjadi pada sepertiga tengah bentang. Keruntuhan ini biasanya terjadi pada balok dengan harga $a/d > 5.5$ untuk beban terpusat dan $L/d > 16$ untuk beban merata. Retak halus vertikal mulai terbentuk ditengah bentang pada tingkat beban kira-

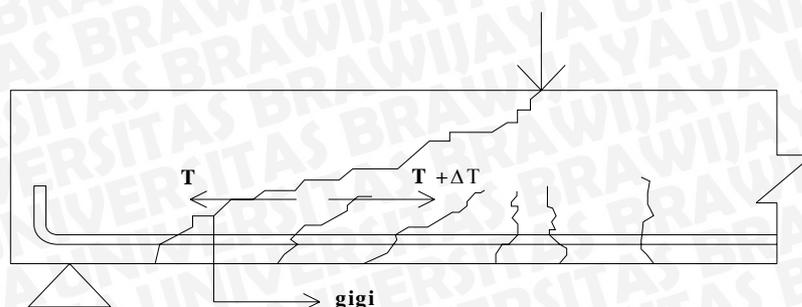
kira 50% dari beban keruntuhan lentur. Dengan meningkatnya beban luar, retak mulai menyebar di daerah tengah bentang dan retak awal mulai melebar dan merambat ke garis netral serta ditandai dengan meningkatnya lendutan di tengah bentang. Bila penulangan balok under reinforced, keruntuhan secara daktail dengan diawali lelehnya tulangan tarik. Keruntuhan ini akan menjadi peringatan yang cukup sebelum balok runtuh.. Agar berperilaku daktail, biasanya perbandingan antara bentang geser dengan tinggi penampang harus lebih besar dari 6 dalam hal beban terpusat, dan melebihi 15 untuk beban terdistribusi. Keruntuhan lentur dicontohkan pada gambar dibawah ini, dengan a adalah bentang geser beban terpusat.



Gambar 2.13. Keruntuhan Lentur
(E.G Nawy,1998)

2.11.2. Keruntuhan Tarik Diagonal

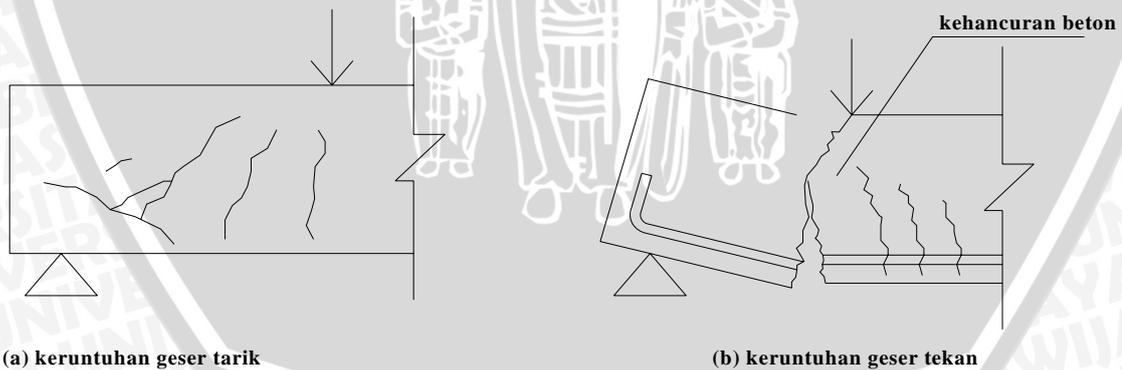
Keruntuhan ini terjadi pada balok dengan perbandingan bentang geser dan tinggi penampang yang sedang, yaitu a/d bervariasi antara 2,5-5,5. Retak pertama mulai terjadi di tengah bentang, arahnya vertikal dan disebabkan oleh lentur, disusul dengan retak geser lentur miring. Awalnya, beberapa retak lentur cenderung untuk melengkung dan membentuk segmen balok diantara retak, yang berupa gigi seperti terlihat pada gambar 2.14. Apabila pangkal dari gigi ini menciut sebagai akibat dari bertambahnya retak lentur, maka ukurannya akan sedemikian rupa sehingga tidak akan sanggup untuk memikul momen akibat ΔT , akar gigi akan pecah, membentuk retak geser-lentur yang miring. Terjadinya retak miring secara tiba-tiba ini, balok tidak akan sanggup meredistribusikan beban.



Gambar 2.14. Keruntuhan tarik diagonal / retak gigi
(Chu-KiaWang, 1994)

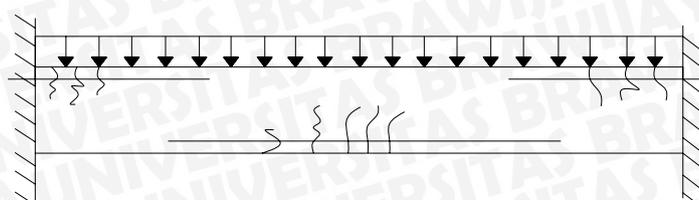
2.11.3 Keruntuhan Geser Tekan dan Tarik

Keruntuhan ini terjadi untuk harga $1 \leq a/d \leq 2,5$ atau $1 \leq L/d \leq 5$. Retak diawali di tengah bentang berupa retak-lentur-halus-vertikal. Lalu diikuti retak miring, yang lebih curam dari retak diagonal tarik, Retak merambat lebih jauh ke dalam daerah tekan dengan bertambahnya beban. Retak ini juga merambat sebagai suatu retak sekunder menuju tulangan tarik dan kemudian menerus secara horisontal sepanjang penulangan tersebut. Keruntuhan akhirnya terjadi sebagai akibat dari (1) keruntuhan anker pada tulangan tarik, yang disebut sebagai suatu keruntuhan geser tarik (*shear tension*) pada gambar 2.15a ,atau (2) keruntuhan akibat hancurnya beton disekitar daerah tekan yang dinamakan geser tekan (*shear compression*) pada gambar 2.15b



Gambar 2.15. Jenis keruntuhan geser pada balok pendek
Sumber : (Chu-Kia Wang,1994)

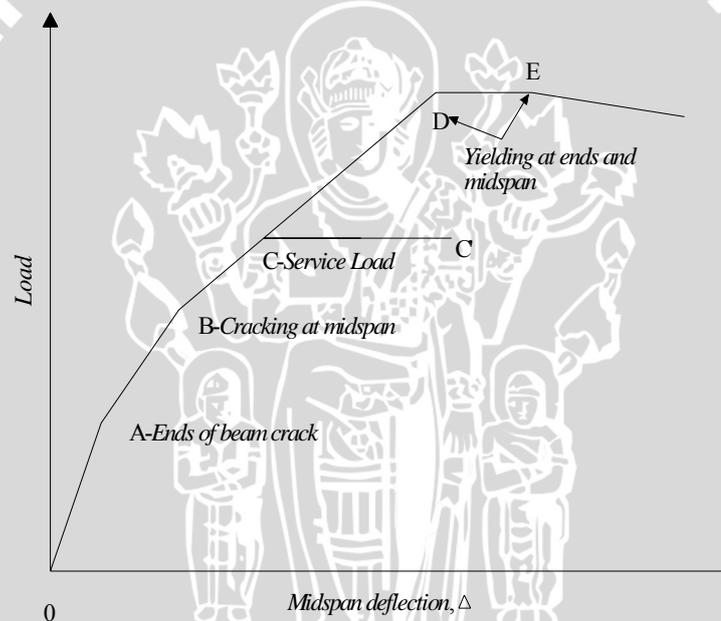
Adapun keruntuhan untuk kondisi jepit-jepit dapat diamati pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Beam and Loading*
(MacGregor,1997)



Gambar 2.17 *Mekanisme runtuh*
(W.H.Mosley,1984)



Gambar 2.18 *Diagram beban-defleksi*
(MacGregor,1997)

Balok tidak mengalami retak dan masih kaku pada garis 0-A. Seiring meningkatnya beban yang diberikan, retak akan terjadi ketika momen diujung melebihi momen retak (MacGregor,1997). Keruntuhan terjadi apabila telah terbentuk tiga sendi plastis.

2.12. Perilaku Retak Beton



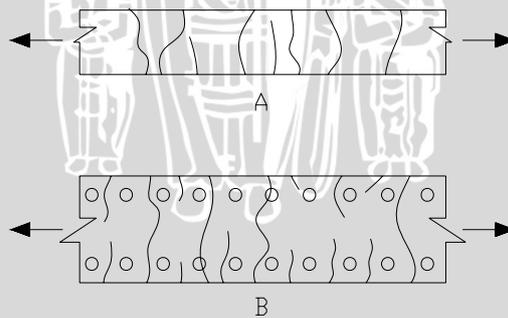
Retak secara umum dapat kita amati pada daerah yang mengalami tarik. Retak-retak ini tidak merugikan kecuali bila lebar retaknya menjadi melebihi batas. Pengendalian lebar retak merupakan hal penting dalam memperhitungkan kemampuan layanan komponen struktur pembebanan jangka panjang.

Metode-metode yang ada dewasa ini mengenai retak, sebagian besar didasarkan atas studi percobaan yang telah menunjukkan hal-hal berikut (Winter, George.1993) :

1. Lebar retak dapat dibuat menjadi sekecil mungkin melalui penggunaan tulangan ulir.
2. Lebar maximum retak yang disebabkan oleh bekerjanya beban kurang lebih berbanding lurus dengan besar tegangan yang terjadi pada tulangan.
3. Lebar retak lentur dapat dibuat sekecil mungkin apabila tulangan tersusun dengan baik pada daerah tarik beton.
4. Lebar retak pada permukaan beton berbanding lurus dengan jumlah penutup beton yang disediakan untuk melindungi tulangan.

2.13. Tipe-tipe Retak

Beton yang mengalami gaya tarik akan mengalami retak sepanjang penampang melintang dengan jarak retak bervariasi antara 0,75 sampai 2 kali ketebalan beton.



Gambar 2.19. Retak Beton Akibat Gaya Tarik

(MacGregor,1997)

lebar retak permukaan yang kecil terjadi pada beton yang diberi penulangan. Pertemuan retak masing-masing sisi terjadi ditengah-tengah. Beton bertulang yang mengalami momen akan mengalami retak seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.20. Retak Beton Akibat Momen
(MacGregor,1997)

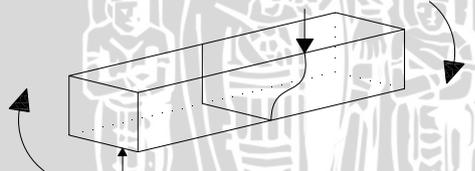
Retak bagian lentur terjadi pada sepertiga di daerah tengah bentang. Retak yang disebabkan oleh geser mempunyai karakteristik kenampakan yang miring.



Gambar. 2.21. Retak Beton Akibat Geser
(MacGregor,1997)

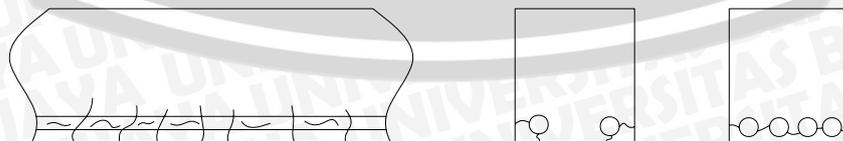
Retak-retak ini naik setinggi garis netral beton dan kadang-kadang juga sampai pada daerah tekan.

Retak akibat torsi murni akan mengelilingi beton.



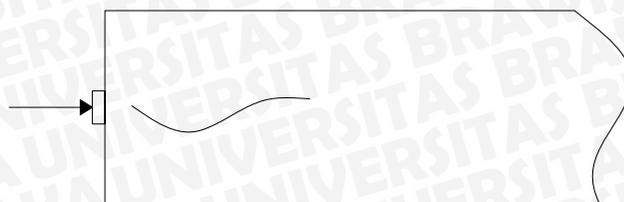
Gambar 2.22. Retak Beton Akibat Torsi
(MacGregor,1997)

Retak juga bisa terjadi disepanjang tulangan karena pada daerah ini terjadi tegangan yang disebabkan interaksi beton pengikat dengan baja tulangan.



Gambar 2.23. Retak Beton Akibat Tegangan Lekat
(MacGregor,1997)

Beban terpusat juga dapat mengakibatkan retak belah atau “retak pecah”



Gambar 2.24 Retak Beton Akibat Gaya Tekan

(MacGregor,1997)

2.14. Lebar Retak Ijin

ACI Commitee 224 memberikan petunjuk mengenai lebar retak maksimum yang diizinkan untuk berbagai kondisi lingkungan.

No	Kondisi lingkungan	Lebar retak	
		Inch	mm
1	Udara kering/membran terlindung	0,016	0,41
2	Udara lembab tanah	0,012	0,3
3	Senyawa kimia	0,007	0,18
4	Air laut basah/kering	0,006	0,15
5	Struktur penahan air (tidak termasuk pipa tak bertekanan)	0,004	0,10

Tabel 2.3. Toleransi Lebar Retak Beton

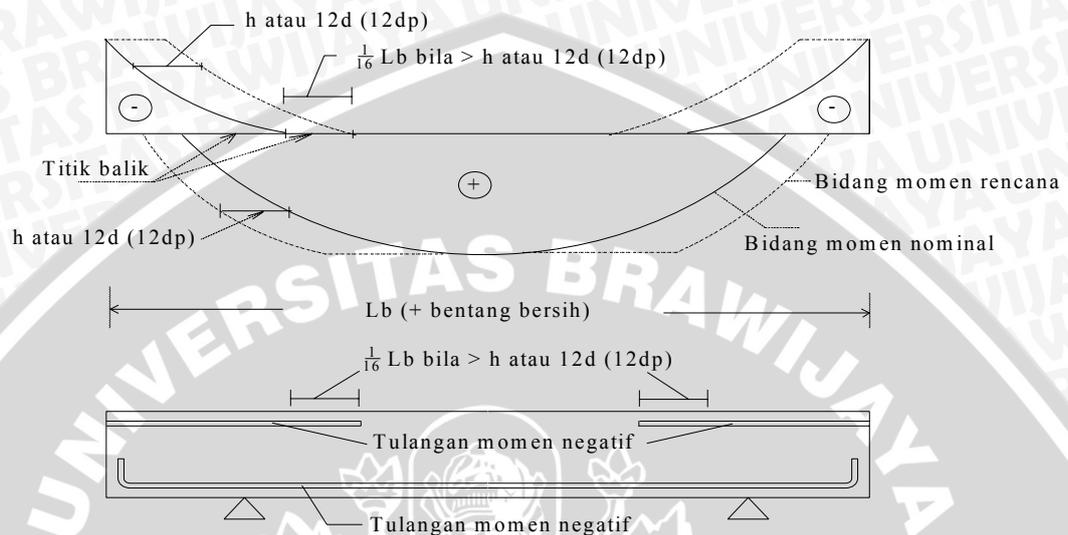
(G. Nawy, Edward,1998)

2.15. Penyaluran tegangan tulangan rangkap

SK-SNI 03-2847-2002 Pasal 14.12 ayat 3 telah mensyaratkan pada tulangan momen negatif 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, $12d_b$, atau $1/16$ dari bentang bersih.

Ketentuan-ketentuan tersebut tidak berlaku untuk tumpuan-tumpuan bebas. Penentuan tersebut adalah untuk mengatasi akibat-akibat dari redistribusi tegangan-tegangan setelah terjadinya retak-retak miring di sekitar tumpuan yang ekuivalen dengan pergeseran bidang momen nominal. Pada gambar 2.25 dapat ditunjukkan bidang-bidang momen dasar untuk beban terbagi rata. Garis penuh menunjukkan bidang momen nominal dan garis putus-putus menunjukkan bidang momen rencana. Bidang momen tersebut menjadi acuan untuk penerusan tulangan

baik tulangan positif maupun tulangan negatif sehingga dapat memberikan perkuatan yang optimal pada balok.



Gambar 2.25. Bidang-bidang momen batas untuk beban terbagi rata

Sumber: Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971

2.16. Hipotesis Penelitian

Hipotesis dari penelitian ini adalah :

1. Keruntuhan yang terjadi pada masing-masing variasi prosentase tulangan tumpuan yang diteruskan ke lapangan adalah keruntuhan lentur.
2. Seiring dengan penambahan prosentase luas tulangan tekan yang masuk ke lapangan, maka kemampuan beton menahan gaya tarik semakin besar.
3. Penambahan variasi prosentase luas tulangan tekan yang masuk ke lapangan, akan berpengaruh pada semakin besarnya kapasitas dukung balok uji.