

BAB III LANDASAN TEORI

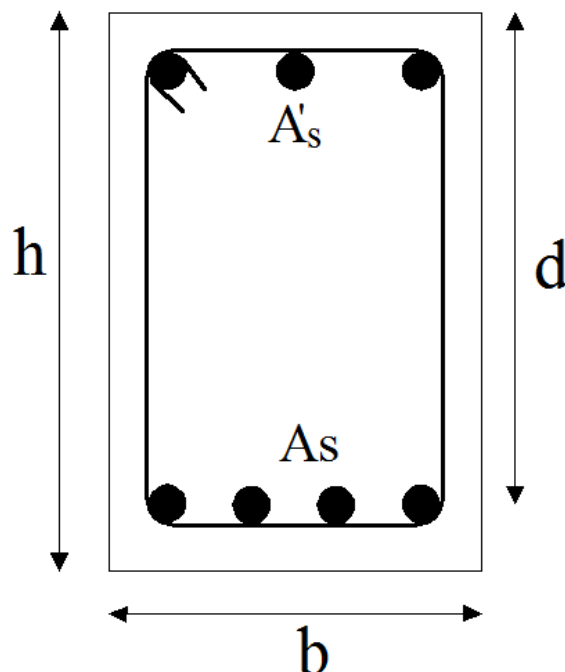
A. Tinjauan Umum

Balok beton bertulang merupakan gabungan logis dari dua jenis bahan/material yaitu beton polos dan tulangan baja. Beton Polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi memiliki kekuatan tarik yang rendah, sedangkan tulangan baja akan memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Kelebihan masing-masing elemen tersebut, maka konfigurasi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat saling bekerja sama dalam menahan gaya-gaya yang bekerja dalam struktur tersebut, dimana gaya tekan ditahan oleh beton sedangkan gaya tarik oleh tulangan baja.

B. Jenis-Jenis Balok Beton Bertulang

Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban dari pelat ke kolom penyangga yang vertikal. Dalam konstruksi gedung biasanya balok dibagi menjadi tiga penampang yaitu balok L, T dan persegi.

1. Balok persegi



Gambar 3.1 Penampang balok persegi dengan tulangan rangkap

Keterangan :

h = tinggi balok,

b = lebar balok,

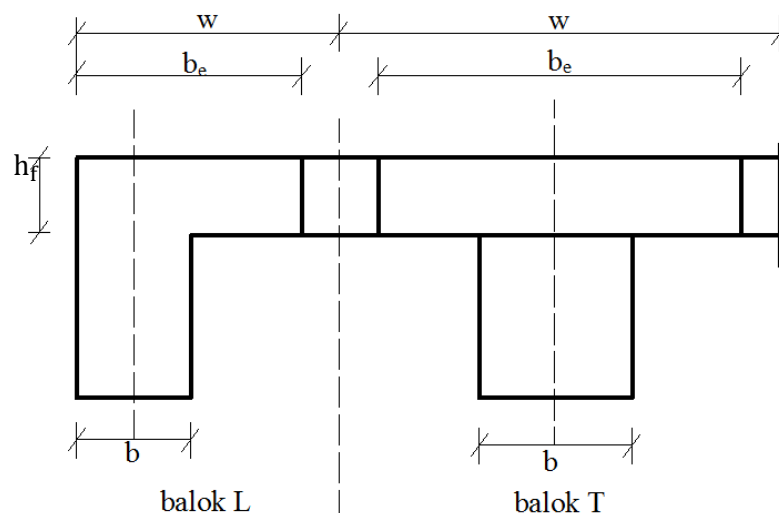
d = tinggi balok dari tepi serat yang tertekan ke pusat tulangan tarik,

A_s = luas tulangan tarik dan

A'_s = luas tulangan tekan

Untuk perencanaan lebar efektif dan tebal balok sudah diatur dalam SNI-03-2847-2002 tentang tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung. SNI-03-2847-2002 menyajikan tinggi minimum balok sebagai berikut ini.

- a. Balok di atas dua tumpuan $h_{\min} = L/16$.
 - b. Balok dengan satu ujung penerus $h_{\min} = L/18,5$.
 - c. Balok dengan kedua ujung penerus $h_{\min} = L/21$.
 - d. Balok kantilever $h_{\min} = L/8$, dengan L = panjang bentang dari tumpuan ke tumpuan.
2. Balok L/T



Gambar 3.2 Penampang balok T dan balok L (Priyosulistyo, 2010)

keterangan :

h_f = Tebal sayap,

b = lebar balok,

w = jarak bersih antar balok dan

b_e = lebar sayap

Sedangkan untuk ketentuan lebar balok T dan L, (SNI-2847-2013) sebagai berikut ini.

- a. Pada konstruksi balok T, sayap dan balok harus dibangun menyatu atau bila tidak harus dilekatkan bersama secara efektif.
- b. Lebar slab efektif sebagai sayap balok T tidak boleh melebihi seper empat panjang bentang balok, dan lebar efektif sayap yang menggantung pada masing-masing sisi badan balok tidak boleh melebihi :
 - 1) Delapan kali tebal slab, dan
 - 2) setengah jarak bersih ke badan di sebelahnya.
- a. Untuk balok dengan slab pada suatu sisi saja, lebar efektif yang menggantung tidak boleh melebihi :
 - 1) $\frac{1}{12}$ panjang bentang balok,
 - 2) enam kali tebal slab, dan
 - 3) setengah jarak bersih ke badan disebelahnya.

C. Pembebanan pada Balok

Buku Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG, 1987) beban yang terjadi pada srtuktur bangunan diakibatkan oleh :

a. Beban mati

Beban mati adalah berat dari semua bagian gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian tak terpisahkan dari gedung

b. Beban hidup

Beban hidup adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan kedalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup dari gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Khusus pada atap kedalam beban hidup dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan maupun tekanan jatuh (energi kinetik) butiran air.

c. Beban angin

Beban angin adalah semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian dari gedung yang disebabkan oleh selisih dalam tekanan udara.

d. Beban gempa

Beban gempa yaitu semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian dari gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Dalam hal pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, maka yang diartikan beban gempa disini adalah gaya-gaya yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu.

e. Beban khusus

Beban khusus adalah semua beban yang terjadi pada gedung atau bagian dari gedung yang terjadi akibat selisih suhu, pengangkutan dan pemasangan, penurunan fondasi, susut, gaya-gaya tambahan yang berasal dari beban hidup seperti gaya rem yang berasal dari kran, gaya setrifugal dan gaya dinamis yang berasal dari mesin-mesin, serta pengaruh pengaruh khusus lainnya.

Acuan yang dipakai dalam analisis pembebanan ini adalah tata cara perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung (SNI 03-2847-2002) acuan tersebut memuat kombinasi pembebanan oleh beban mati (D), beban hidup (L), beban angin(W), beban gempa (E) dan beban khusus (A = atap dan R = hujan) kombinasi tersebut antara lain sebagai berikut ini.

$$1). \text{Beban perlu (terfaktor)} = 1,4 D \text{ atau } \dots\dots\dots(3.1)$$

$$= 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A \text{ atau } R) \dots\dots\dots(3.2)$$

$$2). \text{Beban sementara angin} = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,6 W + 0,5 \\ (A \text{ atau } R) \text{ atau } \dots\dots\dots(3.3)$$

$$= 0,9 D \pm 1,6 W \dots\dots\dots(3.4)$$

$$3). \text{Beban gempa} = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,0 E \text{ atau } \dots\dots\dots(3.5)$$

$$= 0,9 D \pm 1,0 E \dots\dots\dots(3.6)$$

4). Bembebanan khusus, yaitu beban tekanan tanah (H), tekanan fluida (F), beban kejut dan beban benturan. Nilai sebesar 1,6 H dapat ditambahkan

dalam persamaan pada butir (1), (2) dan (3) di atas. Beban $1,4 F$ dapat ditambahkan dalam persamaan pada butir (2). Beban kejut harus dihitung setiap perhitungan beban hidup (L) dalam setiap persamaan diatas. Oleh pengaruh beban benturan sebesar P struktur harus diperhitungkan terhadap gaya statik ekuivalen sebesar $1,2 P$.

D. Analisis Balok Persegi Tulangan Rangkap

Balok merupakan struktur untuk menyalurkan beban dari pelat ke kolom. Dari beban tersebut mengakibatkan gaya-gaya yang mengakibatkan kerusakan pada balok. Ada 3 kemungkinan jenis keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu :

1. Keruntuhan tarik (*Under-Reinforced*)

Keruntuhan tarik terjadi bila jumlah tulangan baja tarik sedikit sehingga tulangan tersebut akan leleh terlebih dahulu sebelum betonnya pecah, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih besar dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu disebut penampang *under-reinforced*, perilakunya sama seperti yang dilakukan pada pengujian yaitu terjadi keretakan pada balok tersebut.

2. Keruntuhan tekan (*Over-reinforced*)

Keruntuhan tekan terjadi bila jumlah tulangan vertikal banyak maka keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih kecil dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu disebut penampang *over-reinforced*, sifat keruntuhannya adalah getas (non-daktail). Suatu kondisi yang berbahaya karena penggunaan bangunan tidak melihat adanya deformasi yang besar yang dapat dijadikan petanda bilamana struktur tersebut mau runtuh, sehingga tidak ada kesempatan untuk menghindarinya terlebih dahulu.

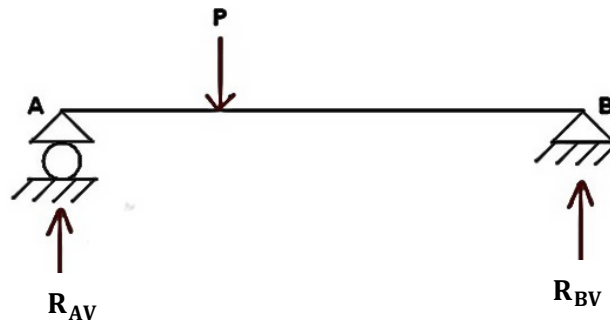
3. Keruntuhan *balance*

Keruntuhan *balance* terjadi jika baja dan beton tepat mencapai kuat batasnya, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) sama besar dengan regangan beton (ϵ_y). Jumlah penulangan yang menyebabkan keruntuhan *balance* dapat dijadikan acuan untuk menentukan apakah tulangan tarik sedikit atau tidak, sehingga sifat keruntuhan daktail atau sebaliknya.

Kerusakan balok terjadi akibat pengaruh gaya luar dan gaya dalam sebagai berikut ini.

1. Gaya luar

Gaya luar yaitu gaya yang ada di luar suatu konstruksi biasanya disebut gaya aksi-reaksi. Gaya aksi dapat diartikan gaya yang menghampiri konstruksi tersebut yang direspon oleh gaya reaksi.



Gambar 3.3 Reaksi perletakan akibat gaya luar

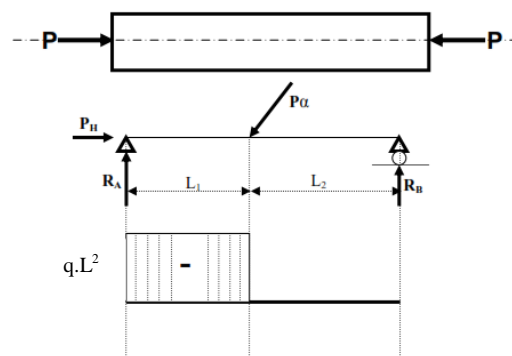
Beban P merupakan gaya aksi kedua tumpuan menimbulkan gaya reaksi yang biasa disebut reaksi tumpuan A vertikal (R_{AV}) dan reaksi tumpuan B vertikal (R_{BV}).

2. Gaya dalam

Gaya dalam yaitu gaya yang bekerja didalam suatu konstruksi. Analisis gaya dalam ada 3 jenis gaya yang bekerja di suatu balok yaitu :

a. Gaya normal (*Normal Force Diagram*)

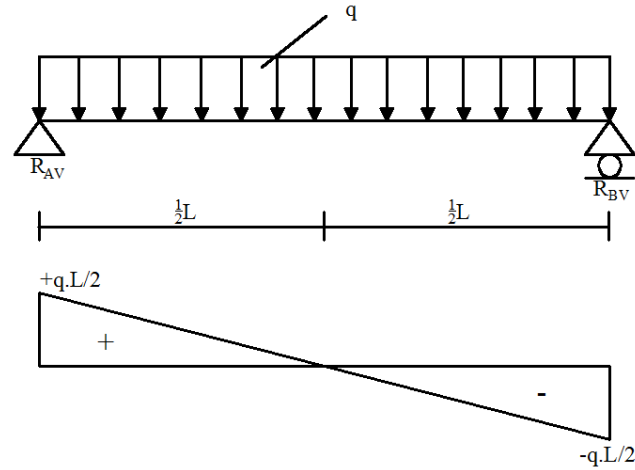
Gaya normal adalah suatu gaya yang garis kerjanya berhimpit atau sejajar dengan garis batang



Gambar 3.4 *Normal Forces Diagram* (NFD)

b. Gaya lintang (*Shear Forces Diagram*)

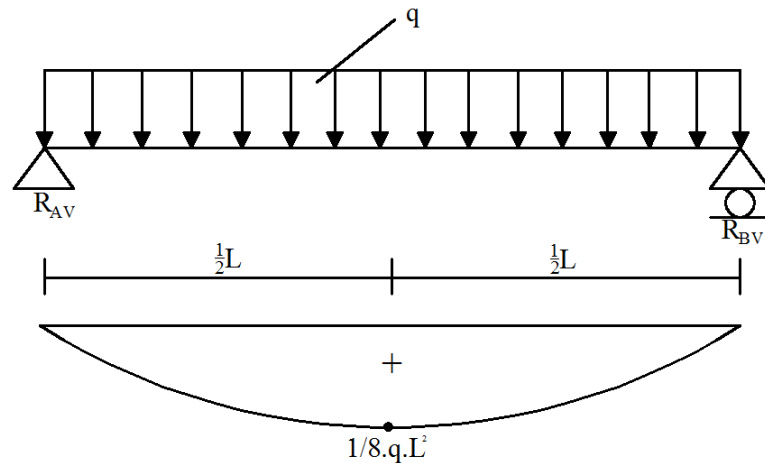
Gaya lintang adalah gaya dalam yang bekerja tegak lurus sumbu balok



Gambar 3.5 *Shear Forces Diagram* (SFD)

c. Momen (*Bending Moment Diagram*)

Momen adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya dalam yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.



Gambar 3.6 *Bending Moment Diagram* (BMD)

Jenis pembebanan dan momen yang terjadi pada balok diatas dapat dikatakan bahwa momen luar harus dilawan oleh momen dalam yang disumbangkan oleh kekuatan dari penampang balok itu sendiri. Besarnya momen *ultimate* diatur dalam SNI 03-2847-2002 sebagai hasil kombinasi

terfaktor dari momen lentur akibat beban mati ($DL = Dead Load$) dan beban hidup ($LL = Live Load$) serta pengaruh beban-beban lainnya yang berhubungan dengan kondisi alam. Momen dalam yang harus dimiliki oleh penampang balok untuk menahan momen luar ultimate (M_u) yang terjadi dinyatakan dalam istilah Momen nominal (M_n). Hubungan M_n dengan M_u sebagai berikut

$$\phi M_n \geq M_u \dots\dots\dots(3.7)$$

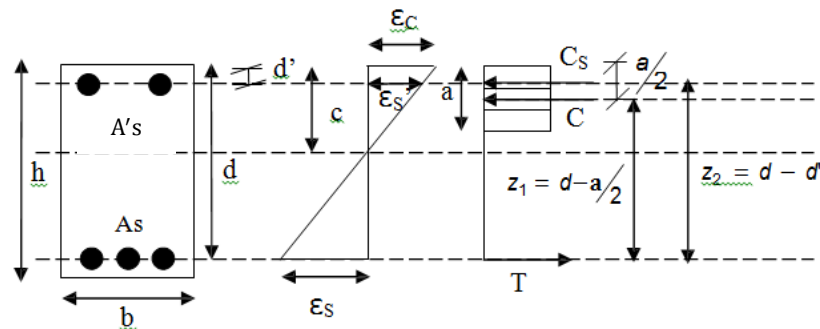
Faktor reduksi (ϕ) merupakan faktor kekuatan untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan kekuatan nominal yang direncanakan. Hal ini bisa terjadi akibat pelaksanaan pencampuran beton yang kurang sesuai spesifikasi, pengecoran yang kurang baik, cuaca saat pengecoran tidak mendukung maupun hal-hal yang lain yang berkaitan dengan pelaksanaan di lapangan. Untuk perencanaan terhadap kuat lentur besarnya faktor reduksi adalah untuk f_c' antara 17-28 MPa β_1 sebesar 0,85, diatas 28 MPa β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan kekuatan sebesar 7 Mpa diatas 28 MPa. Tetapi β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65. Sesuai dengan pasal 10.2.7.3, (SNI-2847-2013)

Setelah nilai momen nominal sudah diperoleh maka dapat dihitung banyaknya pembesiaan yang dibutuhkan untuk perencanaan tulangan lentur pada penampang balok. Besarnya pembesiaan yang direncanakan dinyatakan dalam A_s yang menyatakan luas total pembesiaan yang diperlukan.

Dalam konstruksi bangunan hampir semua balok menggunakan tulangan rangkap. Tulangan rangkap sebenarnya hanya tulangan tambahan pada daerah tekan, dan memudahkan untuk pemasangan sengkang. Fungsi dari tulangan tekan ini sebagai berikut ini.

1. Meningkatkan kekakuan penampang sehingga dapat mengurangi defleksi struktur.
2. Meningkatkan kapasitas rotasi penampang yang berkaitan dengan peningkatan daktilitas penampang.
3. Dapat menahan kemungkinan adanya momen yang berubah-ubah.
4. Meningkatkan momen tahanan penampang karena dimensi penampang.

Gambar 3.7 menunjukkan konsep analisis tulangan rangkap balok.



Gambar 3.7 Diagram regangan dan tegangan balok tulangan rangkap (Adam, 2016)

Untuk meyakinkan kondisi itu maka perlu dilihat apakah nilai kedalaman blok beton a yang didapat dari keseimbangan tulangan terpasang masih lebih kecil atau lebih besar dari a_b . Bila $a < a_b$ maka tulangan terpasang akan menghasilkan penulangan liat, tetapi apabila $a > a_b$ maka tulangan dipasang akan menghasilkan penulangan getas/*brittle*. Untuk menghindari penulangan getas peraturan mensyaratkan agar kemampuan balok hanya dibatasi sampai pada $a = a_b$. Langkah penyelesaian:

1. Menetapkan nilai $\beta_1 =$ untuk f_c' antara 17-28 MPa, β_1 sebesar 0,85, diatas 28 MPa β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan kekuatan sebesar 7 MPa diatas 28 MPa, tetapi β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65. Sesuai dengan pasal 10.2.7.3, (SNI-2847-2013)
2. Memasukan variabel d , f_y dan β_1 ke dalam persamaan 3.8

$$a_b = \beta_1 \cdot 600 \cdot d (600f_y) \dots\dots\dots(3.8)$$
3. Melalui persamaan keseimbangan gaya $C_s + C_c = T_s$ dan melalui beberapa anggapan terlebih dahulu maka akan didapat nilai kedalaman garis netral (c) atau kedalaman blok beton tekan (a). Bila hasil kontrol tersebut didapat kesesuaian dengan anggapan semula maka anggapan-anggapan itu benar, tetapi bila tidak berarti anggapan itu harus diubah berdasarkan hasil dari kontrol tersebut.
4. Anggapan-anggapan tersebut sebagai berikut ini.
 - a. Letak garis/sumbu netral, letak garis sumbu netral dapat dianggap terletak di daerah selimut beton/penutup beton atau diantara tulangan tarik dan tekan. Posisi ini dapat diperkirakan dari perbandingan antara luas tulangan tarik dan tulangan tekan, bila tulangan tarik cukup banyak sehingga

mendekati kondisi berimbang maka letak garis netral di antara tulangan tarik dan tulangan tekan dan bila sebaliknya letak garis netral berada didaerah selimut beton .

- b. Kondisi regangan tulangan tarik dan tekan (leleh atau tidaknya) bila anggapan regangan itu leleh maka gaya tarik atau tekan yang digunakan didapat dari perkalian luasan (A) dan tegangan leleh (f_y) tetap bila tidak leleh maka gaya tarik atau tekan didapatkan dari perkalian antara luasan (A) dan tegangan kerja (regangan x modulus elastisitas beton = $\varepsilon \cdot E$) (Priyosulistyo, 2010).

5. kedalaman garis netral c atau kedalaman blok beton a , dari persamaan $C_s + C_c = T_s$. hasil yang didapat harus digunakan untuk mengontrol ulang anggapan terhadap posisi garis netral dan regangan.

- a. Tulangan tekan tarik :

$$\varepsilon' = m \frac{c-d'}{c} 0,003 \dots\dots\dots(3.9)$$

- b. Tulangan tarik : C_s

$$\varepsilon_s = \frac{d-c}{c} 0,003 \dots\dots\dots(3.10)$$

dengan :

d' = penutup beton tulangan tekan.

d = kedalaman efektif tulangan tarik ($h - d_s$)

6. Kapasitas nominal penampang dapat dihitung sebagai jumlah antara komponen momen kopel pertama dan kedua, sebagaimana dinyatakan dalam formula berikut ini.

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$M_{n1} = (A_s - A's) \cdot f_y \cdot (d - a/2) \dots\dots\dots(3.12)$$

dimana

$$a = \frac{(A_s - A's) \cdot f_y}{(0,85 \cdot f_c' \cdot b)} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$M_{n1} = A's \cdot f_y (d - d') \dots\dots\dots(3.14)$$

Sehingga kapasitas nominal penampang juga dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ;

$$M_n = (A_s - A's) \cdot f_y \cdot (d - a/2) + f_y(d - d') \dots \dots \dots (3.15)$$

atau

$$M_n = A_{s1} \cdot f_y \cdot (d - a/2) + f_y(d - d') \dots \dots \dots (3.16)$$

Untuk menjamin keamanan struktur ditinjau dari aspek kekuatan maka dipersyaratkan kapasitas momen rencana ($M_R = \phi \cdot M_n$) harus lebih besar dari kombinasi terbesar momen luar yang bekerja (M_u), jadi :

$$M_u \leq \phi \cdot M_n \dots \dots \dots (3.17)$$

Persamaan (3.17) hanya dapat diberlakukan apabila tulangan ($A's$) telah meleleh, jika tegangan leleh belum tercapai maka balok harus dianggap sebagai balok bertulang tunggal dan akan lebih tepat jika tegangan aktual (f_c') pada tulangan tekan dan menggunakan gaya aktual untuk keseimbangan momenya.

7. Syarat agar tulangan tekan ($A's$) meleleh dapat diturunkan dengan bantuan segitiga sebangun :

$$\epsilon_s = \frac{c-d}{d} \cdot 0,003 = \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \cdot 0,003 \dots \dots \dots (3.18)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{(A_s - A's) \cdot f_y}{\beta_1 \cdot (0,85 \cdot f_c' \cdot b)} = \frac{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c'} \dots \dots \dots (3.19)$$

hingga dapat diperoleh :

$$\epsilon_s = \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}\right) \cdot 0,003 \dots \dots \dots (3.20)$$

Apabila baja tulangan tekan leleh maka dicapai suatu kondisi dimana

$$\epsilon'_s \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{200000} \text{ sehingga :}$$

$$\left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}\right) \cdot 0,003 \geq \frac{f_y}{200000} \dots \dots \dots (3.21)$$

atau

$$(\rho - \rho') \geq \left(\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{f_y \cdot d}\right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y}\right) \dots \dots \dots (3.22)$$

Jika tulangan tekan ($A's$) belum leleh maka tegangan aktualnya dapat dihitung sebesar $f_s' = \epsilon_s \cdot E_s$ atau

$$f_s' = \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}\right) \cdot 200.300 \dots \dots \dots (3.23)$$

atau

$$f_s' = 600 \cdot \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}\right) \text{ MPa} < f_y \dots \dots \dots (3.24)$$

8. Jika tulangan tekan ($A's$) belum leleh maka tinggi blok tegangan tekan ekuivalen harus dihitung menggunakan tegangan aktual pada tulangan yang diperoleh dari regangan tulangan tekan (ϵ_s) sehingga ;

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A's \cdot f_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots \dots \dots (3.25)$$

dengan demikian kapasitas momen nominal berubah menjadi:

$$M_n = (A_s \cdot f_y - A's \cdot f_s')(d - a/2) + A's \cdot f_s'(d - d) \dots \dots \dots (3.26)$$

9. Pembatasan baja tulangan balok persegi

SNI 2002 menetapkan bahwa jumlah tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,75 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan. Sehingga SNI -2002 menetapkan batasan untuk ρ sebesar :

$$\rho_{mak} = 0,75 \rho_b \dots \dots \dots (3.27)$$

$$\rho' = 0,85 \beta \left(\frac{f_c'}{f_y}\right) \left(\frac{600}{600 + f_y}\right) \dots \dots \dots (3.28)$$

dan batasan rasio untuk penulangan minimum adalah sebesar :

$$\rho_{min} = 1,4 / f_y \dots \dots \dots (3.29)$$

E. Analisis Balok T Tulangan Rangkap

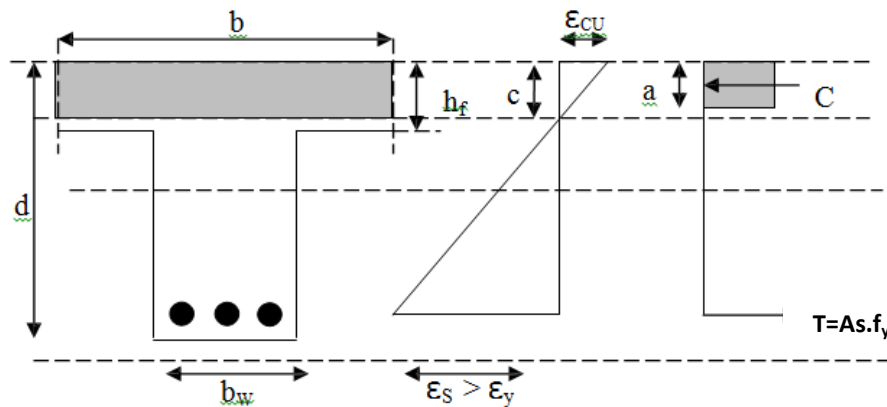
Analisis balok penampang T pada dasarnya adalah proses menentukan dimensi tebal lebar *flens* dan tebal, lebar dan tinggi efektif pada balok juga luas tulangan pada baja tarik. Penentuan tebal *flens* biasanya tidak lepas dari perencanaan struktur pelat, sedangkan dimensi balok terkait dengan kebutuhan menahan gaya geser dan momen lentur yang timbul.

Balok T adalah balok pada bagian interior sedangkan balok L terletak pada bagian eksterior. Prinsip-prinsip dasar yang digunakan dalam

perhitungan balok persegi juga berlaku untuk balok T maupun balok L. Perbedaan pokok terletak pada perhitungan gaya tekan blok beton (C) yang tergantung dari tinggi garis netral (c), sebagai berikut:

1. Balok T palsu

Kasus ini dijumpai pada balok T atau L dimana garis netral berada didalam flens ($c < h_f$), seperti ditunjukkan pada gambar dibawah. kasus ini juga berlaku jika $c > h_f$ dan $a < h_f$ sehingga parameter desain yang diuraikan juga masih dapat digunakan.



Gambar 3.8 Balok T dengan $c < h_f$, (Adam, 2016)

Agar kondisi $c < h_f$ dapat terjadi, maka luas tulangan tarik A_s harus memenuhi :

$$A_s \leq \frac{0,85.f_c'.b.h}{f_y} \dots\dots\dots(3.30)$$

Dalam kondisi ini dijumpai keseimbangan gaya-gaya dalam :

$$C \leq T \dots\dots\dots(3.31)$$

$$C \leq 0,85.f_c'.a.b \dots\dots\dots(3.32)$$

$$T \leq A_s.f_y \dots\dots\dots(3.33)$$

Sehingga diperoleh

$$a \leq \frac{A_s.f_y}{0,85.f_c'.b} \dots\dots\dots(3.34)$$

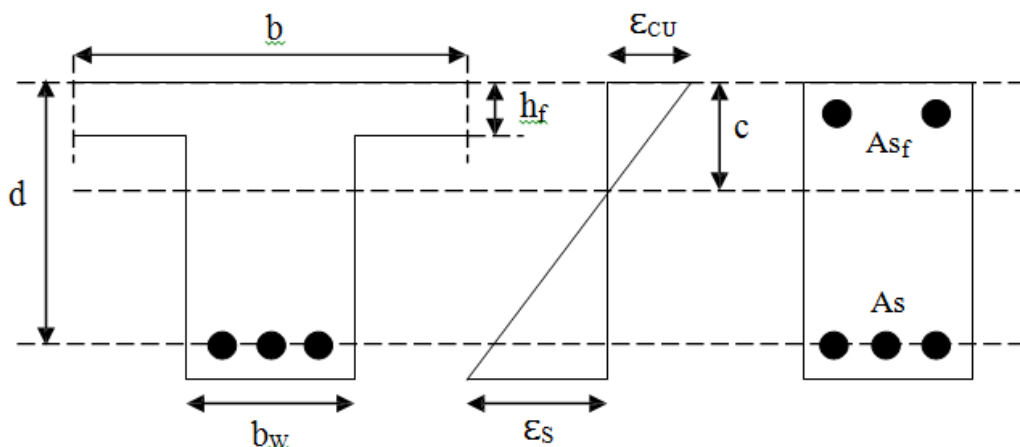
sedangkan kekuatan lentur nominal dapat dihitung:

$$M_n \leq A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) \dots \dots \dots (3.35)$$

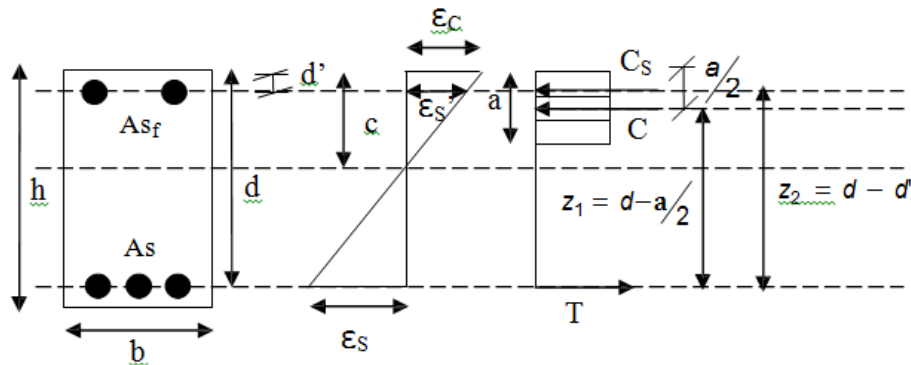
Jika dicermati persamaan diatas sama dengan persamaan – persamaan yang digunakan untuk analisis balok persegi, dengan lebar balok selebar *flens* (*b*).

2. Balok T (murni)

Kasus ini dijumpai pada balok T atau L dimana garis netral berada di dalam flens ($c > h_f$) dan tinggi blok tegangan segi-empat ekuivalen juga lebih besar dari tinggi *flens* ($a > h_f$).



Gambar 3.9 Analogi balok T (Adam, 2016)



Gambar 3.10 Distribusi tegangan dan regangan Balok (Adam, 2016)

Kasus ini dapat diberlakukan serupa dengan balok persegi bertulangan rangkap, dengan menggantikan bagian pelat dari “*flens*” menjadi suatu penulangan imajiner yang luasnya:

$$A_{s_f} \leq \frac{0,85 \cdot f_c' \cdot (b - b_w) \cdot h_f}{f_y} \dots \dots \dots (3.36)$$

Untuk balok yang dipandang sebagai balok T “murni”, gaya tarik sebesar $A_s \cdot f_y$ dari tulangan harus lebih besar daripada kapasitas gaya. Luas flens total sebesar $0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot h_f$ sehingga:

$$a \leq \frac{A_s}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} > h_f \dots \dots \dots (3.36)$$

Atau

$$h_f < 1,18 \cdot \omega \cdot d \leq a \dots \dots \dots (3.37)$$

Dimana

$$\omega \leq \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_c'} \dots \dots \dots (3.38)$$

ω adalah indeks tulangan untuk penampang yang mempunyai flens, dan jika digunakan blok tegangan parabola maka persamaan $h_f < 1,18 \cdot \omega \cdot d \leq a$ dapat ditulis :

$$h_f < \frac{1,18 \cdot \omega \cdot d}{\beta_1} \dots \dots \dots (3.39)$$

Untuk menjamin perilaku daktail maka diberikan batasan penulangan:

$\rho < 0,75 \cdot \rho_b$ dimana

$$\rho_b \leq \frac{b_w}{b} (\bar{\rho}_b \cdot \rho_f) \dots \dots \dots (3.40)$$

$$\rho_f \leq 0,85 \cdot f_c' \cdot (b - b_w) \cdot \frac{h_f}{f_y \cdot b_w \cdot d} \dots \dots \dots (3.41)$$

sedangkan untuk persyaratan tulangan minimum:

$$\rho_w \leq \frac{A_s}{b_w \cdot d} \leq \frac{1,4}{f_y} \dots \dots \dots (3.42)$$

Seperti halnya balok bertulangan rangkap, tulangan tarik dipandang menjadi dua bagian yaitu A_{s1} yang harus mengimbangi gaya tekan segi empat seluas $b_w \cdot a$ dan A_{s2} untuk mengimbangi luas tulangan imajiner A_{sf} , sehingga momen nominal dapat dihitung :

$$M_n \leq M_{n1} + M_{n2} \dots \dots \dots (3.43)$$

$$M_{n1} \leq A_{s1} \cdot f_y \cdot (d - a/2) \leq (A_s - A_{s1}) \cdot (d - a/2) \dots \dots \dots (3.44)$$

$$M_{n2} \leq A_{s2} \cdot f_y \cdot \left(d - h_f/2 \right) \leq A_{sf} \cdot f_y \cdot \left(d - h_f/2 \right) \dots \dots \dots (3-45)$$

F. Analisis Tulangan Geser

Tulangan geser berfungsi untuk menahan gaya geser yang pada umumnya terjadi bersamaan dengan gaya – gaya lain seperti gaya lentur, gaya normal dan torsi. Gaya geser lentur pada balok dapat dilakukan dengan aturan yang sama dengan perencanaan. Perbedaannya terletak pada ukuran balok, diameter tulangan sengkang, jarak sengkang, kualitas beton dan kualitas baja yang sudah diketahui. Ketidak sesuaian yang berlaku dapat menimbulkan kerusakan getas karena kemampuan geser lentur pada balok yang lebih rendah dari pada gaya geser lentur yang terjadi pada saat momen mencapai ultimit. Langkah-langkah hitungan sebagai berikut ini.

- a. Menghitung luasan tulangan sengkang.

$$A_s = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \dots \dots \dots (3.46)$$

$$A_v = 2 \cdot A_s \dots \dots \dots (3.47)$$

- b. Menghitung kemampuan geser lentur tulangan.

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d}{6} \dots \dots \dots (3.48)$$

- c. Menghitung kemampuan geser lentur tulangan sengkang (V_s)

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \dots \dots \dots (3.49)$$

- d. V_s dibatasi pula oleh jarak sengkang sebagai berikut:

- 1). Bila jarak sengkang $s < 300$ mm dan $< d/4$:

$$V_s \leq 4V_c \dots \dots \dots (3.50)$$

- 2). Bila jarak sengkang $s < 600$ mm dan $< d/2$:

$$V_s \leq 2V_c \dots \dots \dots (3-51)$$

- e. Pilih nilai V_s terkecil dari hasil hitungan 3) dan 4)

f. $V_u/\phi = V_s + V_u \rightarrow V_u = \phi \cdot (V_s + V_s)$ dengan $\phi = 0,1 \dots \dots \dots (3-52)$

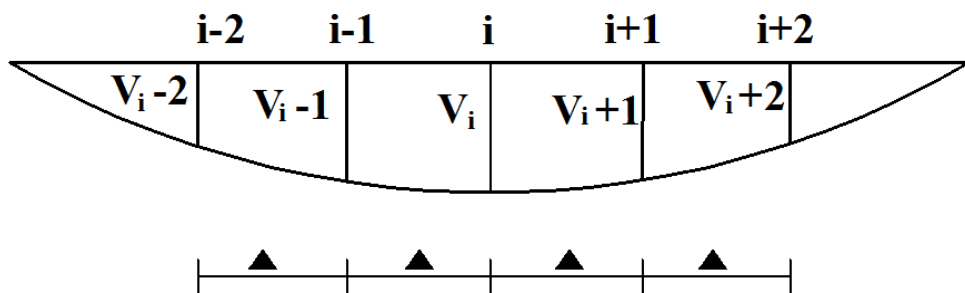
G. Momen

konstruksi balok momen terjadi akibat adanya gaya yang bekerja mempunyai jarak tertentu dari titik yang akan menahan momen tersebut dan besarnya momen tersebut adalah besarnya gaya yang dikalikan dengan jaraknya.

Momen dalam yang harus dimiliki oleh penampang balok untuk menahan momen luar *ultimate* (M_u) yang terjadi dinyatakan dalam istilah Momen nominal (M_n).

H. Kelengkungan (*Curvature*)

Nilai kelengkungan dapat digunakan untuk mengetahui besarnya regangan pada saat terjadi lendutan (Popov,1996) lendutan yang terjadi akan membentuk cekungan pada balok yang menerima beban. Pada Gambar 3.11 akan mengsumsikan nilai kelengkungan ketika balok menerima beban.



Gambar 3.11 Nilai kelengkungan balok (Puluhulawa, 2011)

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \dots\dots\dots(3.53)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta} \dots\dots\dots(3.54)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta} \dots\dots\dots(3.55)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{i-1} - V_{i-1}}{2\Delta} \dots\dots\dots(3.56)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1}}{\Delta^2} \dots\dots\dots(3.57)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1}}{\Delta^2} \dots\dots\dots(3.58)$$

dengan :

1/R : nilai kelengkungan,

V_{i-1} : lendutan pada titik i-1,

- V_i : lendutan pada titik ke i,
- V_{i+1} : lendutan pada titik i+1 dan
- Δ : jarak antar titik lendutan.

I. Tegangan Geser (*Shear Strain*)

Timosheno (1996) menyebutkan tegangan geser τ yang bekerja dipenampang dapat diasumsikan bekerja sejajar dengan gaya geser, yaitu sejajar dengan sisi vertikal penampang, juga dapat diasumsikan bahwa tegangan geser mempunyai distribusi terbagi rata seluruh lebar pelat, meskipun tegangan tersebut bervariasi terhadap tingginya.

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \dots\dots\dots(3.59)$$

dengan :

- V : gaya geser (N),
- Q : momen pertama terhadap jarak y_1 dari sumbu netral (mm^2),
- I : momen inersia(mm^4) dan
- B : momen pelat (mm)

J. Kuat Geser

SNI 03-2847-202 menyebutkan bahwa perencanaan penampang geser harus didasarkan pada Persamaan 3.60.

$$\phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots(3.60)$$

Kuat geser nominal (V_n) dihitung dengan Persamaan 3.61.

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots(3.61)$$

Untuk komponen struktur yang hanya dibebani oleh geser lentur, maka nilai V_c dapat dihitung sesuai pada Persamaan 3.62.

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f_c'}}{6} \right) b_w d \dots\dots\dots(3.62)$$

Bila menggunakan tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur dihitung sesuai Persamaan 3.63.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \dots\dots\dots(3.63)$$

dengan :

- A_v : luas tulangan geser dalam daerah sejarak s , atau luas tulangan geser yang tegak lurus terhadap tulangan lentur tarik dalam suatu daerah sejarak s pada komponen struktur lentur tinggi (mm^2),
- b_w : lebar balok (mm)
- d : jarak dari serat tekan terluar ke titik tulangan tarik diagonal (mm),
- f_c' : kuat tekan beton (N/mm^2),
- f_y : tegangan leleh (Mpa),
- s : spasi tulangan geser (mm),
- V_c : kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton (kN),
- V_n : kuat geser nominal (kN),
- V_s : kuat geser nominal yang disumbangkan oleh sengkang (kN),
- V_u : gaya geser tervaktor (kN) dan
- ϕ : faktor reduksi kekuatan, geser dan torsi diambil 0,75.

K. Lendutan dan Deformasi

Dalam Puluhalawa (2011) defleksi atau perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu sebagai berikut ini.

1. Kekakuan Batang

Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Besar-kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Dengan kata lain semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadipun semakin kecil.

3. Jenis tumpuan yang diberikan

Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah

sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.

4. Jenis beban yang terjadi pada batang

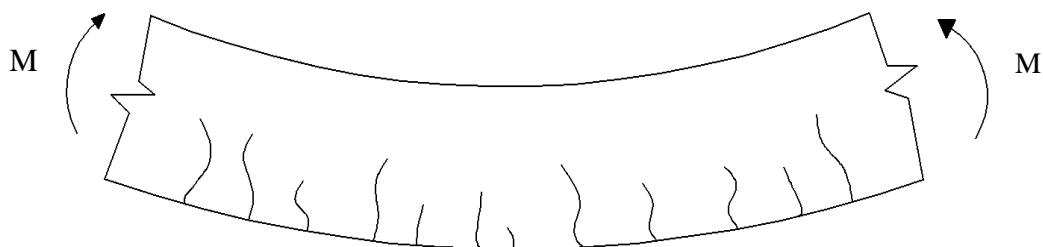
Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik, ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.

L. Pola Retak

Faktor yang mengakibatkan retak pada balok adalah tegangan yang terjadi terutama tegangan tarik. Menurut McCormac (2001) pola retak untuk balok dan pelat suatu arah dibedakan menjadi 5 macam yaitu sebagai berikut ini.

1. Retak lentur

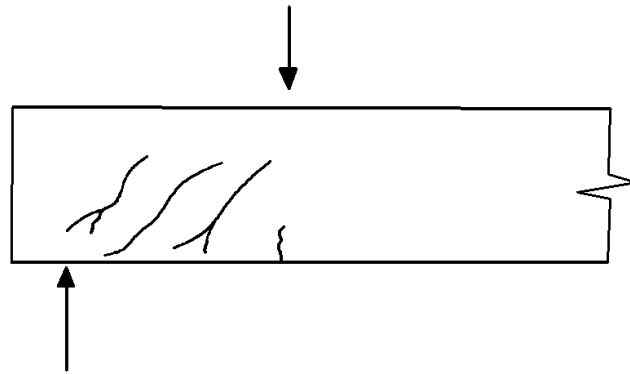
Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik yang mengarah keatas sampai daerah sumbu netral.



Gambar 3.12 Retak lentur murni (Kholilul dkk, 2009)

2. Retak geser

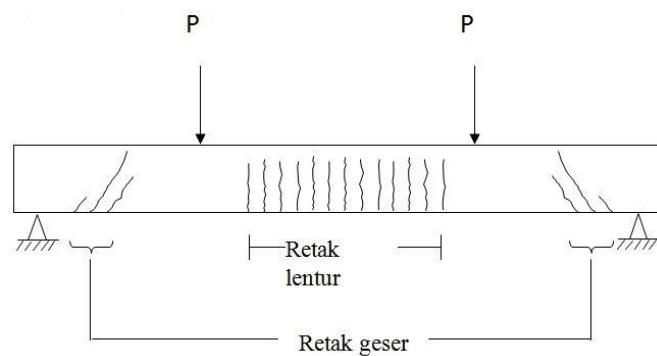
Retak miring karena geser dapat terjadi pada bagian badan baik sebagai retak bebas atau perpanjangan retak lentur. Kadang-kadang, retak miring akan berkembang secara bebas pada balok atau pelat satu arah meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut.



Gambar 3.13 Retak geser (Kholilul dkk, 2009)

3. Retak geser lentur

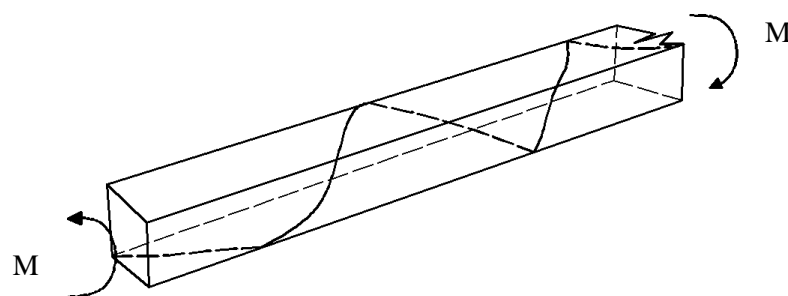
Retak jenis ini adalah retak yang paling umum, retak geser-lentur merupakan perpaduan antara lentur dan retak geser.



Gambar 3.14 Retak geser lentur (Kholilul dkk, 2009)

4. Retak puntir

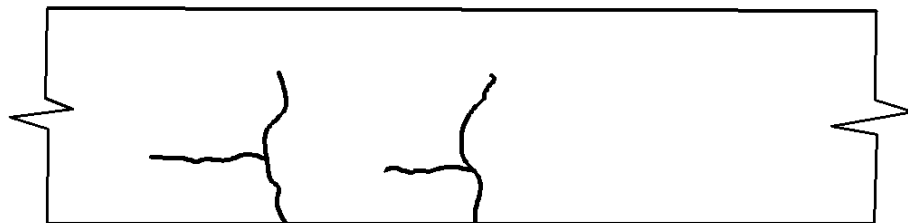
Retak puntir (*torsion crack*) cukup mirip dengan retak geser, tetapi retak puntir ini melingkar balok atau plat satu arah, jika sebuah bentang beton tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan retak dan runtuh disepanjang garis 45^0 karena tarik diagonal yang disebabkan tegangan puntir.



Gambar 3.15 Retak torsi (Kholilul dkk, 2009)

5. Retak lekatan

Retak lekatan terjadi karena tegangan lekatan (*bond stress*) antara beton dan tulangan yang mengakibatkan pemisahan disepanjang tulangan.



Gambar 3.16 Retak lekatan(Kholilul dkk, 2009)

M. Program *Response - 2000*

Program *Response-2000* merupakan program untuk menganalisis sifat-sifat balok dan kolom hasil yang didapat adalah momen, kelengkungan (*curvature*), lendutan (*defleksi*), tegangan geser (*shear strain*), gaya geser (*shear force*), beban aksial (*aksial load*) dan pola retak (*crack*). Menurut Amir (2008) Program *Response-2000* yang dikembangkan oleh Benz dan Vecchio merupakan salah satu program yang dengan mudah dapat digunakan untuk menganalisis balok yang dibebani suatu gaya tertentu dengan kombinasi beban aksial, momen dan geser. Dalam penelitian yang dilakukan adalah pengujian lentur terhadap balok tampang persegi di laboratorium dan sebagai pembandingnya digunakan program *Response-2000*. Dari kedua hasil pengujian tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa program *Response-2000* cukup akurat dalam menampilkan respon dari balok berupa prediksi. Langkah-langkah analisis menggunakan program *Response- 2000* sebagai berikut ini.

Tabel 3.1 Tampilan menu program *Response-2000* (I Beton, 2011)

File	Define	Loads	Solve	View	Options	Help
New Open Close Save Save As Print Preview Print Print Setup MRU List Exit	Quick Define Edit General Material Properties Transverse Reinf Longitudinal Reinf Tendons	Loads Time Dep. Effects Detail T&S Strains Strain Discontinuity Full Member Properties	Full-Response More-Detail One Load 2-Strain 1-Strain M-N Interaction M-V Interaction N-V Interaction Stop Analysis	Cross Section 1 Cross Section Plot 9 Cross Section Plots Next Load Stage Load-Deformation Plot Pushover Results	Preferences Print in Color Object Options Insert Beam Graphic Insert Chart Deselect Selection	Contents Using Help

a. Klik program *Response -2000*

- b. Kemudian *Klik* menu *Define* → *Quick define 1* yaitu bertujuan untuk memberi nama penelitian dan juga memilih mutu baja dan mutu beton. *klik next*.
- c. *Define* → *Material Properties* menu ini untuk memasukan mutu material yang akan digunakan yaitu mutu beton (f_c') dan mutu baja (f_y)
- d. *Define* → *Concrete Section* dalam menu ini pengguna bisa menentukan bentuk balok yang akan dianalisis dan memasukan dimensinya.
- e. *Define* → *Transverse reinforcemen* untuk memasukan diameter tulangan sengkang, jarak sengkang dan selimut beton, dengan langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - 1) *Name* di isi dengan nama sengkang
 - 2) *Stirrup spacing* memasukkan angka jarak sengkang
 - 3) *Bar Area* memasukkan luasan tulangan sengkang
 - 4) *Dist.to top* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang paling atas.
 - 5) *Dist,to bottom* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang bawah.
 - 6) *Bar Type* memasukan jenis sengkang yang akan digunakan, karena jenis sengkang tertutup maka dimasukkan *closed stirrup*.
 - 7) *Rebar type* diisi *long*.
- f. *Define* → *longitudinal reinforcemen* menu ini berfungsi untuk memasukan tulangan pokok. Langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - 1) *Name* memberi nama tulangan tersebut tulangan tarik maupun tulangan tekan.
 - 2) *Number of bar* menu untuk memasukkan jumlah tulangan.
 - 3) *Bar area* untuk memasukan luas tulangan per satu batang
 - 4) *Dist, from bottom* memasukan angka, pada jarak berapakah tulangan tersebut dipasang, yaitu dihitung dari ujung balok paling bawah. Kemudian *klik add*, karena balok benda uji tulangan rangkap maka harus membuat dua jenis tulangan pokok dengan memasukan angka pada menu *Dist, from bottom* yang berbeda.

- g. *Load* → *load* menu ini untuk memasukan jenis pembebanan dan besar beban yang akan dimasukan kebenda uji, yaitu berupa beban aksial, momen dan *shear*.
- h. *Load* → *full member properties* menu untuk memasukan jenis pembebanan, jarak beban terpusat dan jenis tumpuan. karena kita hanya memakai beban merata dan tumpuan sendi rol maka kita hanya mengisi pada *length subjected to shear* dengan nilai setengah bentang benda uji, dan memasukan jenis tumpuan pada *left side properties* kita pilih *support on bottom*.
- i. *Solve* → *section response* untuk melihat respon balok dan deformasi benda uji hasil dari hasil analisis program *Response-2000*.
- j. *Solve* → *member response* menu ini untuk melihat hasil analisis dari data benda uji yang telah di *input* ke dalam langkah-langkah diatas yaitu berupa grafik *curvature distribution, deflection, shear strain distribution* dan *load*
→ *max deflection*
- k. Untuk mengambil data hasil analisis kita bisa mengcopy dengan cara *klik* dua kali pada grafik, maka akan muncul data dan kemudian *klik copy*.