

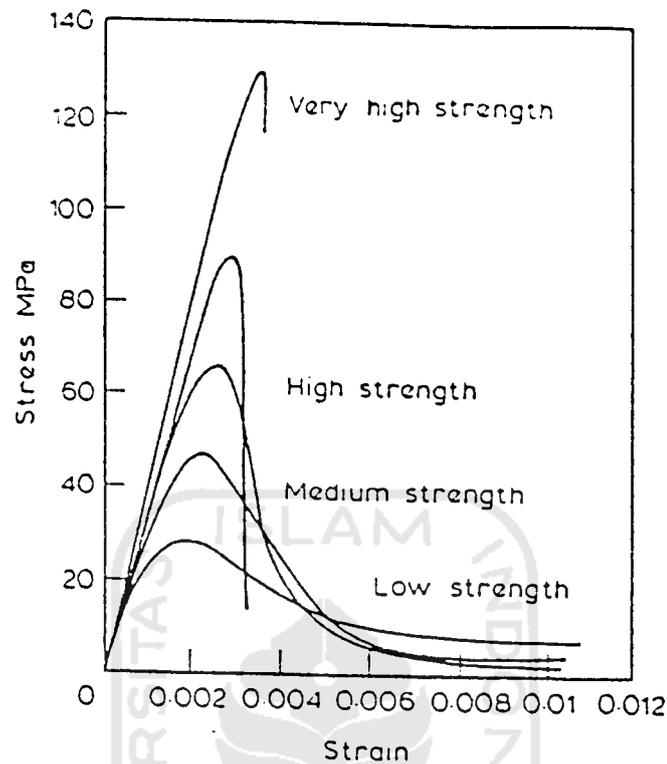
## BAB III

### ANALISA BALOK BETON BERTULANG MUTU TINGGI

#### 3.1 Umum

Kekuatan beton diukur dari keawetan dan sifat perubahan bentuknya, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor penentu antara lain kekuatan mortar, ikatan antara agregat dan mortar, dan kekuatan agregat. Pada beton mutu tinggi, jumlah retak mikro ikatan lebih sedikit karena sifat kompatibilitas kekuatan dan sifat elastis agregat dengan mortar lebih baik, serta makin tingginya kekuatan lekatan tarik (*tensile bond strength*), juga kekuatan terhadap beban lebih tinggi dibandingkan pada beton normal.

Dengan mengamati kurva tegangan-regangan kuat beton pada gambar 3.1 (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G.-Editor, 1985), tampak karakteristik yang membedakan beton mutu lebih tinggi dari beton normal. Sudut awal kurva-E lebih curam, bagian yang menaik dari kurva-E lebih linier, sudut dari bagian yang menurun kurva-E lebih curam dan batas regangan lebih rendah. Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 28 MPa-83 MPa (4.000 psi-12.000 psi), perbedaannya tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan.



Gambar 3.1 Kurva tegangan-regangan

Oleh karena itu, rumus modulus elastisitas untuk beton normal dipandang *overestimate* dan tidak memenuhi. Untuk beton mutu tinggi dengan kuat desak beton 41 MPa -83 MPa, dianjurkan untuk menggunakan rumus (Standar baru SNI T-15-1991-03) sebagai berikut:

$$E_c = (3320\sqrt{f_c'} + 6900)(W_c / 2300)^{1,5} \text{MPa} \quad (3-1)$$

dengan  $E_c$  = modulus elastisitas beton tekan,

$W_c$  = berat beton dalam satuan  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$f_c'$  = kuat tekan beton lebih dari 41 MPa.

### 3.2 Analisis Lentur

Beban yang bekerja pada struktur akan menghasilkan momen dan deformasi pada elemen-elemen struktur. Momen pada balok merupakan akibat dari deformasi regangan yang disebabkan oleh tegangan lentur yang dihasilkan oleh beban luar .

Dengan bertambahnya beban, balok menahan regangan dan defleksi tambahan yang mengakibatkan timbulnya retak-retak lentur sepanjang bentang balok. Penambahan beban yang terus menerus pada tingkat pembebanan menyebabkan keruntuhan dari elemen struktur saat beban eksternal mencapai kapasitas dari elemen tersebut. Tingkat pembebanan seperti itu dikenal sebagai keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. Untuk itu perlu diketahui besarnya momen maksimum yang dapat disediakan oleh penampang balok, yang dapat dihitung berdasarkan rumus lentur balok, dari konsep material homogen :

$$f = \frac{M c}{I} \quad (3-2)$$

dengan  $f$  = tegangan lentur,

$M$  = momen yang bekerja pada balok,

$c$  = jarak serta terluar terhadap garis netral,

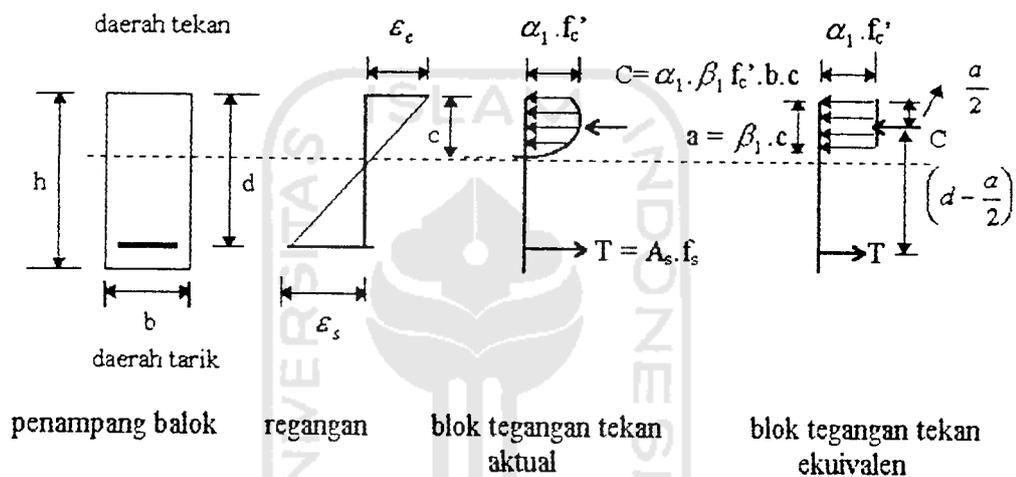
$I$  = momen inersia penampang balok terhadap garis netral.

Penggunaan rumus lentur tersebut dapat digunakan untuk balok dari sebarang bahan yang sama dengan bentuk dan berperilaku elastik pada seluruh jenjang kekuatannya.

Konsep lain adalah kopel momen dalam ( $C = T$ ) yang jika digunakan untuk menganalisa kuat balok akan bersifat lebih umum dan dapat digunakan untuk baik untuk bahan balok homogen atau tidak, juga untuk balok yang mempunyai distribusi tegangan

linier maupun non linier. Konsep ini menjabarkan gaya-gaya dalam balok beton bertulang, sehingga mampu menggambarkan pola tahanan dasar yang terjadi.

Dalam analisa penampang balok disini, telah ditetapkan dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif balok ( $d$ ), tinggi total ( $h$ ), kuat tekan beton ( $f_c'$ ), kuat leleh baja ( $f_y$ ), dan modulus elastis baja ( $E_s = 2.10^5$  MPa). Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 3.2 :



Gambar 3.2 Distribusi tegangan dan regangan internal beton bertulang

Untuk balok yang disebabkan oleh keruntuhan akibat meluhnya tegangan baja menunjukkan bahwa blok tegangan ekuivalen aman untuk digunakan bahkan untuk tegangan tekan diatas 83 MPa atau 12.000 psi (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G.-Editor, 1985). Karena itu dalam analisis lentur disini, digunakan blok tegangan tekan ekuivalen sebagai dasar perhitungan kemampuan balok dalam menahan lentur.

Dari gambar 3.1 dan berdasarkan prinsip keseimbangan gaya-gaya horisontal, gaya tekan  $C$  dalam beton dan gaya tarik  $T$  dalam baja harus seimbang satu sama lain, yaitu :

$$C = T,$$

sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_s, \quad (3-3)$$

dengan :  $\alpha_1$  = intensitas tegangan pada blok tegangan,

$\beta_1$  = rasio tinggi blok tegangan terhadap tinggi sumbu netral,

$b$  = lebar balok,

$h$  = tinggi total balok,

$A_s$  = luas baja tarik, dan

$f_s$  = tegangan dalam tarik baja.

Akibat gaya tekan  $C$  dan gaya tarik  $T$  yang dipisahkan oleh lengan momen  $\left(d - \frac{a}{2}\right)$

seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.1, dihasilkan momen tahanan internal  $M$  sebagai berikut :

$$M = T \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3-4a)$$

jika ditinjau terhadap gaya tarik, dan

$$M = C \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3-4b)$$

jika ditinjau terhadap gaya tekan beton.

Analisa penampang persegi bertulangan tarik terhadap tulangan lentur .

1. Asumsi awal bahwa tegangan yang terjadi pada baja tulangan  $f_s$  sama dengan tegangan luluh baja  $f_y$ , sehingga gaya tarik dalam balok :

$$T = A_s \cdot f_y, \quad (3-5)$$

dengan luas baja tarik sebagai berikut :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d , \quad (3-6a)$$

dengan :  $\rho$  = rasio penulangan, dan

$d$  = tinggi efektif balok.

## 2. Pembatasan penulangan tarik

Berdasarkan persamaan 3-6a diperoleh rasio tulangan baja tarik:

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (3-6b)$$

Untuk lebih menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba-tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa tulangan, maka diperlukan batas minimum tulangan, yaitu :

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_r} \quad (3-7)$$

sehingga dipenuhi persyaratan :

$$\rho \geq \rho_{\min}$$

Rasio baja minimum tersebut yang termasuk dalam peraturan ACI 1989, konservatif untuk balok-balok beton bertulang persegi empat pada semua tingkat kekuatan, kecuali untuk beton dengan mutu sangat tinggi dimana  $f_c' > 100$  Mpa (berdasarkan percobaan yang dilakukan di Universitas Cornell oleh Nilson, A.H.). Masih menurut Nilson, untuk menjamin pola keruntuhan daktail di dalam lentur, maka peraturan ACI ayat 10.3.3 menetapkan batasan  $\rho$  maksimum adalah sebagai berikut :

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \alpha \cdot \beta_1 \left( \frac{f_c'}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) \quad (3-8)$$

Pada blok tegangan dalam gambar 3.1, nilai rasio tinggi blok tegangan terhadap sumbu netral  $\beta_1$  untuk beton mutu tinggi berbeda dibandingkan dengan beton normal seperti yang terdapat dalam peraturan ACI ( Ibrahim, H.H. dan MacGregor, J.G., 1997). Pada beton normal, nilai  $\beta_1$  adalah sebagai berikut :

$$0,65 \leq \beta_1 \leq 0,85 \quad (3-8)$$

Nilai  $\beta_1$  pada persamaan di atas tidak konservatif untuk dipakai dalam perhitungan balok dengan mutu tinggi. Beberapa percobaan yang dilakukan oleh Cusson dan Paulte, memberikan hasil yang lebih rendah dari nilai tersebut. Hasil uji lain di Universitas Toronto, menunjukkan nilai  $\beta_1$  lebih rendah, sekitar 70% dari nilai yang diberikan oleh peraturan ACI. Pada prinsipnya  $\beta_1$  cenderung lebih rendah dengan meningkatnya kekuatan beton. Adapun nilai  $\beta_1$  untuk beton mutu tinggi sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0,95 - \frac{f_c'}{400} \geq 0,70 \quad f_c' \text{ dalam MPa} \quad (3-10a)$$

$$\beta_1 = 0,95 - \frac{f_c'}{58.000} \geq 0,70 \quad f_c' \text{ dalam psi} \quad (3-10b)$$

Demikian pula halnya dengan nilai parameter yang menunjukkan intensitas tegangan pada blok tegangan  $\alpha_1$ . Untuk beton normal biasanya diambil 0,85; pada beton mutu tinggi nilainya menjadi lebih rendah, yaitu :

$$\alpha_1 = 0,85 - \frac{f_c'}{800} \geq 0,725 \quad f_c' \text{ dalam MPa} \quad (3-11a)$$

$$\alpha_1 = 0,85 - \frac{f_c'}{116.000} \geq 0,725 \quad f_c' \text{ dalam psi} \quad (3-11b)$$

Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 4.000 psi-12.000 psi ( 28 MPa - 83 MPa ), perbedaannya tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan. Sedangkan untuk menentukan nilai regangan luluh baja  $\epsilon_y$ , digunakan teori elastisitas sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{f}{E}, \quad (3-12a)$$

sehingga diperoleh regangan luluh baja :

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3-12b)$$

### 3. Menentukan tinggi blok tegangan tekan

Tinggi blok tegangan tekan dapat diperoleh berdasarkan keseimbangan gaya internal balok pada persamaan 3-3 sebagai berikut :

$$A_s \cdot f_y = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot b \cdot c,$$

dengan :  $a = \beta_1 \cdot c$ ,

maka :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot b}, \quad (3-13)$$

dengan : a = tinggi blok tegangan tekan.

### 4. Menghitung kuat lentur nominal

Kuat lentur nominal balok beton bertulang persegi empat dengan mutu tinggi dapat dihitung dengan persamaan biasa :

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right), \quad (3-14a)$$

dengan  $\left(d - \frac{a}{2}\right)$  = lengan momen internal, yaitu jarak antara resultan gaya tekan

beton dengan gaya tarik di tulangan.

Persamaan 3-14a dapat dinyatakan juga dengan persamaan berikut :

$$M_n = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left[ 1 - \frac{1}{2} \rho \left( \frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_c'} \right) \right], \quad (3-14b)$$

dengan  $\frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_c'} = m$ , maka :

$$M_n = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left( 1 - \frac{1}{2} \rho \cdot m \right) \quad (3-14c)$$

dan koefisien lawan (*coefficient of resistant*) :

$$k = \frac{M_n}{b \cdot d^2} = \rho \cdot f_y \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \rho \cdot m \right), \quad (3-15a)$$

atau

$$\rho = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot k}{f_y}} \right) \quad (3-15b)$$

Persyaratan kekuatan untuk lentur dapat dinyatakan berikut ini :

$$\phi M_n > M_u$$

dengan :  $M_u$  = momen akibat beban berfaktor, dan

$\phi$  = faktor reduksi momen.

Bila suatu penampang persegi dengan ukuran yang telah ditetapkan, diperlukan mempunyai kekuatan yang lebih besar dari kekuatan yang tersedia dengan hanya menggunakan tulangan tarik saja (tulangan sebalah). Diperlukan tambahan tulangan tarik dan pemberian tulangan tekan.

Prosedur untuk perencanaan penampang persegi dengan tulangan rangkap.

1. Menghitung kapasitas/momen nominal penampang dengan tulangan tarik saja, dengan menggunakan tulangan tarik maksimum yang diijinkan.

$$M_{n1} < M_n$$

dengan luas tulangan tarik :

$$A_{s1} = \rho \cdot b \cdot d \quad (3-16)$$

2. Kelebihan momen

$$M_{n2} = M_n - M_{n1} \quad (3-17)$$

ditahan oleh tambahan tulangan tarik bersama dengan tulangan tekan :

$$C_s = \frac{M_{n2}}{d - d'} \quad (3-18)$$

Luas tulangan tekan :

$$A_s' = \frac{C_s}{f_s'} \quad (3-19)$$

dengan :  $f_s' = f_y$  bila  $\epsilon_s' \geq \epsilon_y$ , dan  $f_s' = E_s \cdot \epsilon_s'$  bila  $\epsilon_s' < \epsilon_y$ .

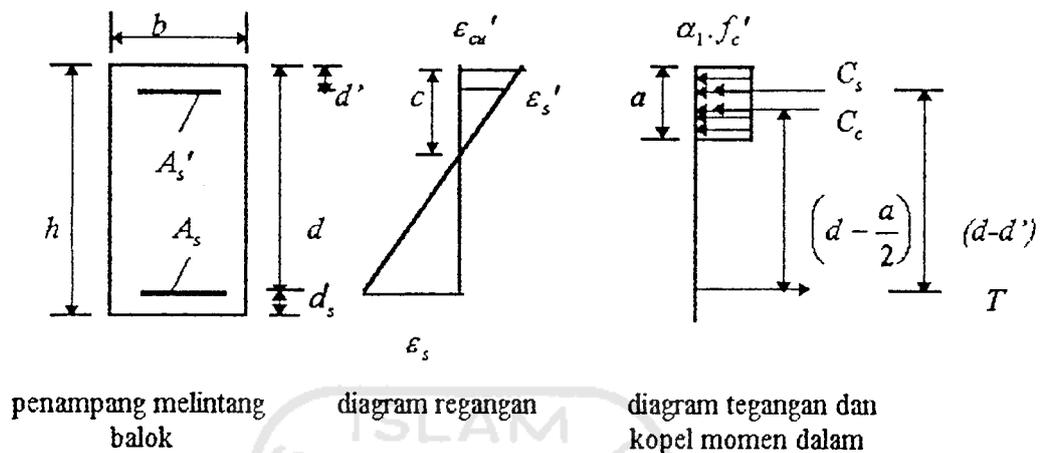
Dari keseimbangan gaya dalam diperoleh  $T_2 = C$ , sehingga tambahan tulangan tarik :

$$A_{s2} = \frac{T_2}{f_y} \quad (\text{baja tarik telah leleh}), \quad (3-20)$$

dengan luas tulangan tarik :

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (3-21)$$

Distribusi tegangan pada balok bertulangan rangkap, dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 3.3 Distribusi tegangan dan regangan pada balok bertulangan rangkap

### 3.3 Analisis Geser

ACI Committe 363 telah menganjurkan bahwa diperlukan lebih banyak data mengenai jumlah minimum kebutuhan tulangan geser untuk mencegah retak diagonal. Peraturan ACI (revisi 1992) menyediakan prosedur baru untuk menghitung jumlah minimum tulangan geser pada balok beton mutu tinggi berkekuatan lebih dari 69 MPa (10.000 psi).

Beton mutu tinggi dengan kekuatan desak yang tinggi dan kesesuaian dalam kuat tarik beban, retakan geser yang terjadi lebih tinggi juga. Karena itu diperlukan jumlah tulangan geser minimum yang lebih banyak, serta jarak sengkang minimum juga harus dibatasi (Yoon, Y.S., Cook, W.D., dan Mitchell, D., 1996).

Pada beton mutu tinggi retakan miring akibat peningkatan beban dalam balok berkurang dengan cepat daripada peningkatan  $\sqrt{f_c'}$  untuk  $f_c'$  lebih besar dari 55 MPa atau 8000 psi. Hal ini diimbangi oleh keefektivan peningkatan dari sengkang

dalam balok beton mutu tinggi. Pengujian lainnya menyarankan bahwa kebutuhan jumlah minimum tulangan badan bertambah sesuai pertambahan  $f_c'$ . Oleh karena itu ACI membatasi  $\sqrt{f_c'}$  sampai 100 psi kecuali jumlah tulangan minimum memenuhi (Mac Gregor, J.G.,1997).

Perencanaan kekuatan geser menurut ACI adalah dengan meninjau kekuatan geser nominal  $V_n$  dari penjumlahan dua faktor kontribusi :

$$V_n = V_c + V_s, \quad (3-22)$$

dengan  $V_n$  adalah kekuatan geser nominal,  $V_c$  adalah kekuatan geser dari balok yang dikerahkan oleh beton, dan  $V_s$  adalah kekuatan geser akibat penulangan geser.

Perencanaan kekuatan geser pada balok adalah sebagai berikut ini.

1. Persamaan-persamaan desain untuk kuat geser batang-batang tanpa tulangan badan menghitung kekuatan geser dengan kombinasi geser dan lentur menurut SNI adalah sebagai berikut :

$$V_c = 1/7 \left( \sqrt{f_c'} + 120 \cdot \rho \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b \cdot d \quad (3-23a)$$

ACI-ASCE Committee menyatakan persamaan berikut untuk menghitung geser;

$$V_c = \left( 1,9 \sqrt{f_c'} + 2500 \cdot \rho \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) b \cdot d \quad (3-23b)$$

Untuk susunan variabel normal, perhitungan kedua dalam tanda kurung pada persamaan akan menjadi sama dengan  $0,1 \sqrt{f_c'}$ , dimasukkan dalam persamaan (3-23b) menghasilkan :

$$V_c = 2 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d, \quad (3-24a)$$

dalam satuan SI menjadi :

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \quad (3-24b)$$

## 2. Perumusan batas keruntuhan geser balok dengan tulangan badan

Gambar 3.4 menunjukkan free body antara ujung balok dan retakan miring, proyeksi horisontal retak diambil sebagai  $d$ , mengesankan retak membentuk bidang  $45^\circ$ . Jika  $s$  adalah spasi sengkang, jumlah sengkang diambil dari retakan adalah  $d/s$ . Pengasumsian bahwa semua sengkang leleh saat runtuh, geser ditahan oleh sengkang adalah :

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (3-25)$$

Jika  $V_u$  melebihi  $\phi V_c$ , sengkang harus disediakan sebagai :

$$V_u \leq \phi V_n, \quad (3-26)$$

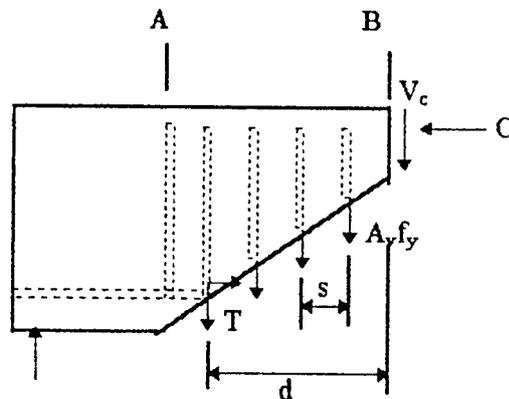
dimana  $V_u$  adalah gaya disebabkan beban berfaktor,  $\phi$  adalah faktor reduksi, dan  $V_n$  adalah perlawanan geser nominal.  $V_n$  diberikan oleh persamaan ( 3-26 ), dalam desain ini secara umum disusun ulang dari bentuk :

$$\phi V_s \geq V_u - \phi V_c \quad \text{atau} \quad V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

Pengantar persamaan (3-25) disusun ulang memberikan jarak sengkang :

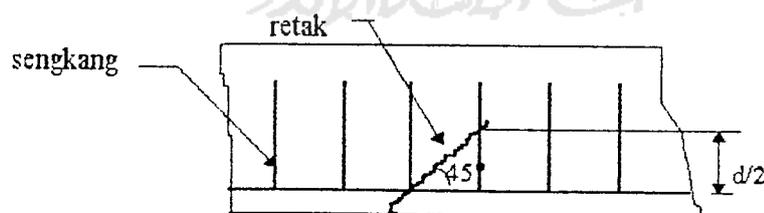
$$s = \frac{A_s \cdot f_y \cdot d}{\frac{V_u}{\phi} - V_c} \quad (3-27)$$

Persamaan ini digunakan untuk sengkang vertikal, seperti tampak pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Geser ditahan oleh sengkang vertikal

Sengkang-sengkang tidak menahan geser kecuali dilalui oleh sebuah retakan, untuk alasan ini peraturan ACI 11.5.4.1 menetapkan jarak maximum sengkang-sengkang vertikal lebih kecil dari  $d/2$  atau 24 in, sehingga setiap  $45^\circ$  retak dapat ditahan setidaknya oleh satu sengkang (gambar 3-4). Retak minimum menjalar dari ketinggian batang tulangan tarik, dapat dicegah oleh sedikitnya satu tulangan sengkang, seperti ditunjukkan dalam gambar dibawah ini.



Gambar 3.5 Sengkang maksimum

Jika  $\frac{V_u}{\phi} - V_c = V_s \geq 4 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$ , jarak sengkang maximum yang diijinkan kurang

dari setengah yang digambarkan. Jarak maximum adalah  $< d/4$  atau 12 in. Hal ini dilakukan untuk dua alasan, pertama jarak sengkang lebih dekat untuk memperkecil

retakan dan jarak sengkang lebih dekat memberikan angkur yang lebih baik pada ujung yang lebih rendah diagonal desaknya.

### 3. Tulangan badan minimum.

Kebutuhan tulangan badan minimum menurut ACI , adalah :

$$A_{vmin} = \frac{50.b.s}{f_y} \quad (3-28a)$$

Ekuivalen penyediaan tulangan badan meneruskan tegangan geser 50 psi, untuk  $f_c' = 2500$  psi, 50 psi adalah tegangan geser miring dari persamaan ( 3-24a ), dalam satuan SI, persamaan ( 3-28a ) menjadi :

$$A_{vmin} = \frac{b.s}{3f_y} \quad (3-28b)$$

Untuk balok dengan  $f_c'$  lebih besar dari 10.000 psi,  $\sqrt{f_c'}$  dibatasi sampai 100 psi kecuali jika tulangan minimum yang disediakan memenuhi persamaan ( 3-29a ) dan ( 3-29b ).

$$A_{vmin} = \frac{f_c'}{5000} \left( \frac{50.b.s}{f_y} \right) \leq \frac{150.b.s}{f_y} \quad (3-29a)$$

dalam satuan SI menjadi persamaan ( 3-27b ) (Yoon,Cook,dan Mitchell;1996):

$$A_{vmin} = \frac{f_c'}{35} \left( \frac{b.s}{3f_y} \right) \leq \frac{b.s}{f_y} \quad (3-29b)$$