

BAB III

TEORI KEKUATAN GESER DAN KOMBINASINYA DENGAN KOMPONEN LENTUR

3.1 Kekuatan Geser Tanpa Tulangan Geser dan Kombinasi Dengan Lentur

Kekuatan geser tanpa tulangan geser ditinjau dari teori lingkaran Mohr, terdapat perbedaan prinsip mengenai arah dari tegangan tarik utama antara beton bertulang biasa dengan beton prategang. Balok beton prategang umumnya mempunyai kuat geser yang lebih tinggi daripada balok bertulang biasa. Didalam beton bertulang biasa, tegangan normal f_t adalah tegangan tarik pada satu pihak dari garis netral. Untuk beton prategang, f_t merupakan tegangan tekan dalam seluruh unsur. Dengan menggantikan f_t dengan $-f_t$, terlihat bahwa besar dari tegangan tarik utama mengecil.

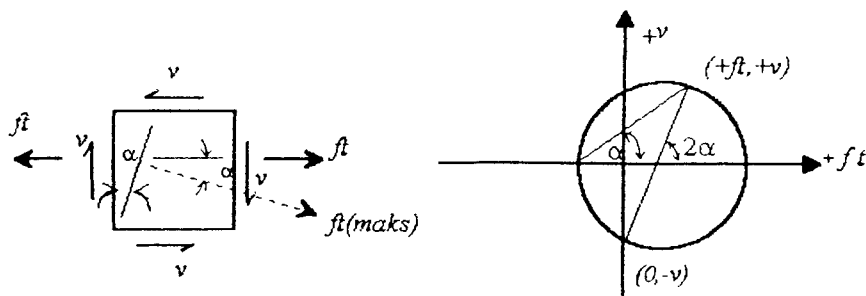
$$f_{t(maks)} = \frac{f_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{f_t}{2}\right)^2 + v^2} \dots\dots\dots (3-1)$$

Rumus untuk balok beton prategang:

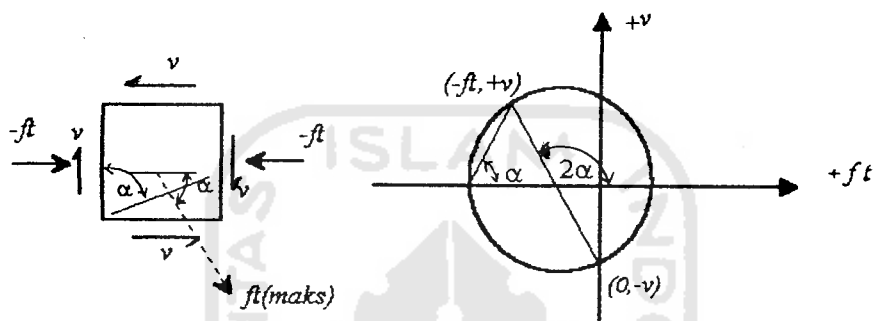
$$f_{t(maks)} = -\frac{f_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{f_t}{2}\right)^2 + v^2} \dots\dots\dots (3-2)$$

Keterangan rumus:

- $f_t(maks)$ = tegangan tarik utama,
- f_t = tegangan normal,
- v = tegangan geser satuan.



(a) Tegangan prinsipal - Balok beton bertulang



(b) Tegangan prinsipal - Balok beton prategang

Gambar 3.1.Perbandingan arah dari tegangan tarik utama

Pada balok beton prategang, sudut α yang dibentuk oleh tegangan tarik utama dengan sumbu balok adalah lebih besar kemiringannya daripada balok beton bertulang biasa, sebagaimana terlihat pada gambar diatas. Apabila terjadi retak miring kecil saja, maka kemungkinan retak miring tersebut akan lebih horisontal dibandingkan dengan retak tersebut dalam beton bertulang biasa. Dalam beton prategang terdapat dua jenis retak miring:

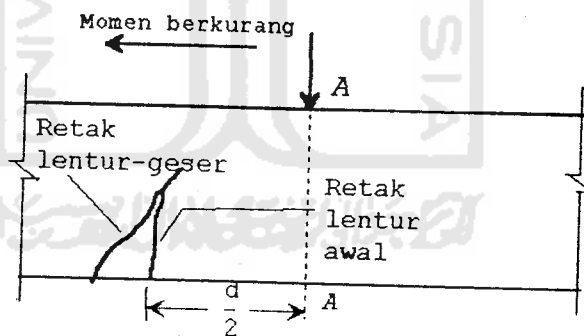
- 1) retak geser lentur yang terjadi di tengah bentangan balok yang diakibatkan beban titik yang besar di atas balok tersebut,

- 2) retak geser badan yang terjadi pada badan yang tipis dekat titik tumpuan dari balok yang diakibatkan oleh gaya geser yang besar.

Dalam perhitungan tegangan yang terjadi, anggapan pada balok bertulang biasa hanya terdapat retak geser lentur saja. Sedangkan anggapan pada balok prategang, retak dapat terjadi disebabkan oleh kedua penyebab seperti di muka.

3.1.1 Kekuatan Retak Geser Akibat Lentur

Retak geser lentur timbul akibat tegangan utama yang tinggi di dekat titik tinjauan dari retak lentur awal. Pada Gambar 3.2, searah berkurangnya momen, retak lentur terjadi pada jarak sekitar $d/2$ dari beban titik.



Gambar 3.2. Retak geser akibat lentur

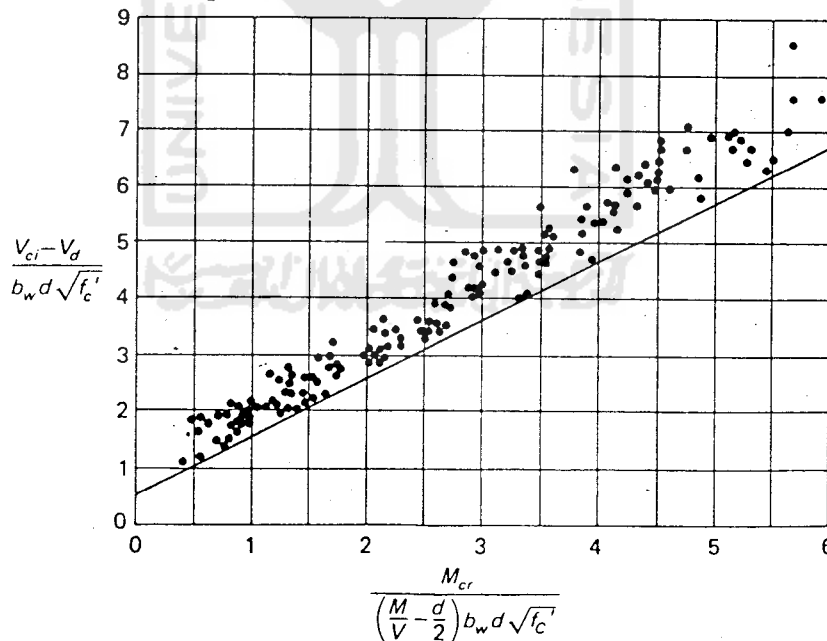
Pada Gambar 3.3 terdapat koordinat cartesius yang menggambarkan adanya hubungan linier. Dalam koordinat cartesius itu, untuk sumbu ordinatnya menggambarkan fungsi $V_{ci} - V_d$, V_d adalah geser akibat beban layan mati V_{ci} adalah

kekuatan geser nominal total. Sedangkan sumbu absisnya mencakup momen retak netto M_{cr} akibat beban layan. Tegangan batas akibat beban layan yang digunakan untuk M_{cr} sama dengan modulus runtuh (secara konservatif digunakan $6\sqrt{f'_c}$ lb/inchi² sedangkan untuk satuan SI, dipakai $0,5\sqrt{f'_c}$ MPa), ditambah tegangan tekan yang diberikan oleh gaya prategang (setelah kehilangan) f_{pe} yang terjadi pada serat ekstrim, dikurangi dengan tegangan tarik f_d akibat beban mati, sehingga ACI membuat rumus sebagai berikut :

$$M_{cr} = \frac{I}{Y_t} \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right) \dots\dots\dots (3-3)$$

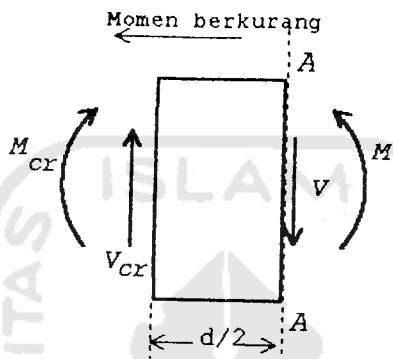
sedangkan dalam satuan SI (SNI 1991) menjadi

$$M_{cr} = \frac{I}{Y_t} \left(\frac{1}{2} \sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d \right)$$



Gambar 3.3. Perbandingan dari geser terhadap retak lentur-geser yang bersangkutan di dalam beton prategang dengan perbandingan dari momen retak lentur terhadap bentang geser.

Pada grafik di muka sumbu absisnya mencakup $M_{cr}/(M/V - d/2)$, yang memberikan geser akibat beban yang bekerja pada jarak $d/2$ dari penampang yang sedang diselidiki. Momen M dan geser V menimbulkan suatu momen retak pada jarak $d/2$ dari suatu penampang (Gambar 3.4) berikut ini.



Gambar 3.4 Hubungan geser-momen

$$M - M_{cr} = \frac{V + V_{cr}}{2} * \left(\frac{d}{2}\right) \dots \dots \dots (3-4)$$

Karena selisih antara V dan V_{cr} umumnya kecil, sehingga $V_{cr} = V$, maka rumus berubah menjadi

$$M - M_{cr} = V \left(\frac{d}{2}\right) \dots \dots \dots (3-5)$$

Dengan menyelesaikan untuk M_{cr} ,

$$M_{cr} = M - V \left(\frac{d}{2}\right) \dots \dots \dots (3-6)$$

$$= V \left(\frac{M}{V} - \frac{d}{2}\right) \dots \dots \dots (3-7)$$

Akhirnya, geser pada penampang yang ditinjau menjadi

$$V = \frac{M_{cr}}{\left(\frac{M}{V} - \frac{d}{2}\right)} \dots\dots\dots (3-8)$$

Hubungan yang linier untuk kekuatan retak geser akibat lentur yang dihasilkan tegangan utama yang tinggi di sekitar suatu retak lentur, menurut Gambar 3.3 adalah sebagai berikut

$$\frac{V_{ci} - V_d}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} = 0,6 + \frac{M_{cr}}{\left(\frac{M}{V} - \frac{d}{2}\right) b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}} \dots\dots\dots (3-9)$$

Sejak tahun 1971, ACI telah menyederhanakan rumus di atas dengan mengabaikan suku pengurang $d/2$. Dengan demikian kekuatan retak geser-lentur V_{ci} , Rumus ACI menjadi

$$V_{ci} = 0,6 \sqrt{f'_c} b_w d + \frac{V_i \cdot M_{cr}}{M_{maks}} + V_d \geq 1,7 \sqrt{f'_c} b_w d \dots (3-10)$$

atau satuannya dalam SI menjadi

$$V_{ci} = 0,05 \sqrt{f'_c} b_w d + \frac{V_i \cdot M_{cr}}{M_{maks}} + V_d \geq 1,7 \sqrt{f'_c} b_w d$$

Dalam persamaan (3-10), M_{maks} menggantikan M dari persamaan (3-9) dan mewakili momen maksimum yang dapat terjadi pada penampang yang ditinjau, akibat beban-beban berfaktor yang bekerja (yaitu, beban-beban yang bekerja selain berat balok, dan prategang). V_{ci} menggantikan V dari persamaan (3-8) dan mewakili gaya geser pada penampang yang ditinjau akibat beban berfaktor yang menimbulkan momen maksimum.

3.1.2 Kekuatan Retak Geser Badan Balok

Retak yang terjadi pada badan balok ini timbul lebih awal dari retak karena lentur. Retak ini biasanya terjadi dekat dengan tumpuan dari penampang dengan badan balok yang tipis sebagai hasil dari tegangan utama yang tinggi.

Untuk peninjauan ini, maka balok beton prategang dianggap sebagai bahan yang homogen. Dengan demikian persamaan (3-2) dapat diterapkan secara langsung. Pada beberapa percobaan geser balok beton prategang telah menunjukkan bahwa retak badan balok ini biasanya dimulai dekat titik pusat penampang, maka tinjauan geser yang terbesar terjadi di daerah tersebut. Dengan menyelesaikan suku v dari persamaan (3-2) akan diperoleh rumus seperti di bawah ini.

$$\left(f_{t(maks)} + \frac{f_t}{2} \right)^2 = \left(\frac{f_t}{2} \right)^2 + v^2$$

$$f_{t(maks)}^2 + f_{t(maks)} * f_t + \left(\frac{f_t}{2} \right)^2 = \left(\frac{f_t}{2} \right)^2 + v^2$$

$$v = f_{t(maks)} \sqrt{1 + \frac{f_t}{f_{t(maks)}}} \dots (3-11)$$

Dengan f_t adalah tegangan tekan pada ketinggian titik pusat, dan $f_{t(maks)}$ = tegangan tarik utama \leq kekuatan tarik beton.

Karena persamaan (3-11) seharusnya disesuaikan dengan kriteria untuk kekuatan geser dari balok bertulang biasa,

f_t (maks) diambil sebesar $3,5\sqrt{f'_c}$. Persamaan dengan demikian menjadi

$$v = 3,5\sqrt{f'_c} \sqrt{1 + \frac{f_t}{3,5\sqrt{f'_c}}} \dots\dots\dots (3-12)$$

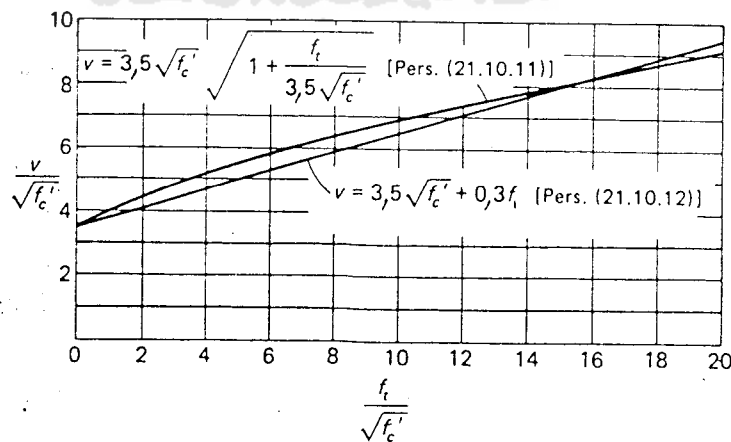
Persamaan (3-12) yang ditunjukkan dalam Gambar 3.5, menunjukkan bahwa persamaan ini dapat didekati dengan suatu garis lurus,

$$v = 3,5\sqrt{f'_c} + 0,3 f_t \dots\dots\dots (3-13)$$

atau, dalam peraturan ACI, dengan mengalikan dengan $b_w d$ untuk memberikan kekuatan geser nominal,

$$V_{ow} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc})b_w d \dots\dots\dots (3-14)$$

menurut rumus diatas, f_{pc} didefinisikan sebagai tegangan tekan dalam beton, setelah kehilangan prategang, pada titik pusat dari penampang yang memikul beban-beban luar, atau bila titik pusat berada pada flens dari tampang T, f_{pc} adalah tegangan pada pertemuan antara flens dan badan.



Gambar 3.5 Perbandingan dari tegangan geser maksimum teoritis dengan pendekatan garis lurus

Bila tendon prategang direntangkan, komponen vertikal V_p akan timbul membantu memikul geser. Pada peraturan ACI-11.4.2 memberikan rumus sebagai berikut,

$$V_{cw} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc})b_w d + V_p \dots\dots\dots (3-15)$$

sedangkan dalam satuan SI (SNI 1991)

$$V_{cw} = 0,3(\sqrt{f'_c} + f_{pc})b_w d + V_p$$

Secara alternatif, kekuatan retak geser badan ditentukan dengan menggunakan persamaan tegangan utama (ACI-11.4.2.2), persamaan (3-12), tegangan utama f_t (maks) dibatasi dengan $4\sqrt{f'_c}$. Sehingga pada persamaan (3-12) yang dikalikan dengan $b_w d$ dan ditambahkan dengan V_p menjadi,

$$V_{cw} = 4\sqrt{f'_c} \sqrt{1 + \frac{f_{pc}}{4\sqrt{f'_c}}} * b_w * d + V_p \dots\dots\dots (3-16)$$

sedangkan dalam satuan SI (SNI 1991) menjadi

$$V_{cw} = \frac{1}{3}\sqrt{f'_c} \sqrt{1 + \frac{3f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}} * b_w * d + V_p$$

Kekuatan geser nominal V_n pada retak miring terjadi diberikan oleh yang terkecil dari V_{ci} dan V_{cw} , yang ditentukan oleh ACI untuk beton berbobot normal.

Bila menggunakan persamaan (3-10) dan (3-15) atau (3-16) untuk menghitung V_{ci} dan V_{cw} , tinggi efektif d harus diambil sebagai jarak dari serat tekan ekstrim ke titik

pusat dari tendon prategang, atau sebesar 80% dari tinggi total penampang, tergantung mana yang lebih besar.

Di dalam menghitung pengaruh prategang f_{pc} , prategang penuh setelah kehilangan dapat digunakan hanya apabila tendon ditanamkan sejarak yang melebihi panjang, dihitung dari penampang yang ditinjau. Penampang kritis pada geser maksimum umumnya sejarak $h/2$ dari sisi tumpuan, sehingga daerah antara tumpuan dan $h/2$ harus direncanakan untuk geser pada penampang kritis.

3.1.3 Alternatif Sederhana dari Peraturan ACI

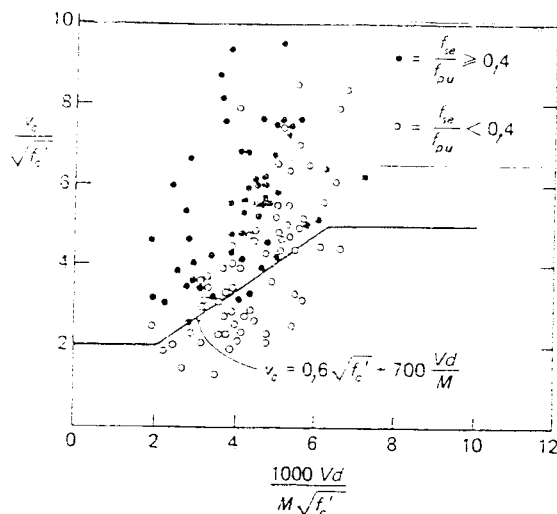
Bila kekuatan tarik tendon yang diberi prategang efektif f_{se} kira-kira sama dengan 40% dari kekuatan tarik f_{pu} dari tulangan lentur, maka kekuatan geser nominal dapat diambil sebesar

$$V_c = \left(0,6 \sqrt{f'_c} + 700 \frac{V_u * d}{M_u} \right) b_w * d \dots \dots \dots (3-17)$$

dalam satuan SI (SNI 1991) menjadi

$$V_c = \left(\frac{1}{20} \sqrt{f'_c} + 5 \frac{V_u * d}{M_u} \right) b_w * d$$

Persamaan ini dapat dipandang sebagai gradien linier antara penggunaan tegangan satuan nominal minimum $v_c = 2 \sqrt{f'_c}$ dan suatu batas atas $v_c(\text{maks}) = 5 \sqrt{f'_c}$. Data penunjang untuk hubungan alternatif ini diperlihatkan dalam gambar berikut ini.



Gambar 3.6 Persamaan alternatif untuk menghitung v_c

Didalam menerapkan persamaan (3-17) dari ACI-11.4.1, V_u adalah geser maksimum akibat beban berfaktor pada penampang dan M_u adalah momen yang bekerja bersamaan. $V_u d / M_u$ juga dibatasi dengan nilai maksimum 1,0 dan d adalah tinggi efektif sebenarnya ke titik pusat tulangan prategang. Persamaan (3-8) pada dasarnya memberikan kekuatan retak geser lentur yang dinyatakan serupa caranya dengan beton bertulang biasa. Karena prosentase tulangan adalah rendah di dalam beton prategang digunakan nilai yang konstan.

3.2 Kombinasi Geser Dengan Tulangan Geser

Pada dasarnya perhitungan untuk penulangan geser pada beton prategang sama seperti perhitungan untuk beton bertulang biasa. Kekuatan geser nominal total V_n dapat

dinyatakan sebagai jumlah dari V_c yang dikerahkan oleh beton dan V_s yang disumbangkan oleh tulangan, sehingga persamaannya,

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (3-18)$$

Kekuatan nominal V_c yang dikaitkan dengan beton dapat ditentukan dengan,

1. persamaan (3-17) bila prategang efektif paling tidak sebesar 40% dari kekuatan tarik baja,
2. yang terkecil dari persamaan (3-10) dan (3-15) untuk v_{ci} dan V_{cw} dapat digunakan berapapun besarnya prategang.

Untuk sumbangan penulangan geser digunakan persamaan,

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \dots\dots\dots (3-19)$$

dengan

- A_v = luas efektif dari tulangan geser
 s = jarak dari tulangan geser

Sama dengan balok bertulang biasa, balok beton prategang juga harus diberi jumlah minimum tulangan geser bilamana $V_u > V_c/2$. Namun, persyaratan ini dapat ditangguhkan bila dilakukan percobaan yang menunjukkan bahwa kekuatan lentur dan geser dapat dikembangkan tanpa adanya tulangan geser.

Bila diperlukan tulangan geser minimum, ACI memberikan luas tulangan minimum A_v sebesar

$$A_v = 50 \frac{b_w s}{f_y} \dots \dots \dots (3-20)$$

sedangkan bila dialihkan satuan ke dalam SI, menjadi

$$A_v = \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y}$$

Rumus ini juga digunakan untuk beton yang bukan prategang.

Secara alternatif, untuk unsur-unsur prategang saja, gaya prategang efektif dapat mencapai 40 % dari kekuatan tarik dari baja, sehingga luas minimum dapat diambil sebesar

$$A_v = \frac{A_p s}{80} \left(\frac{f_{ps}}{f_y} \right) \left(\frac{s}{d} \right) \sqrt{\frac{d}{b_w}} \dots \dots \dots (3-21)$$