

5 PERENCANAAN GESER DAN TORSI

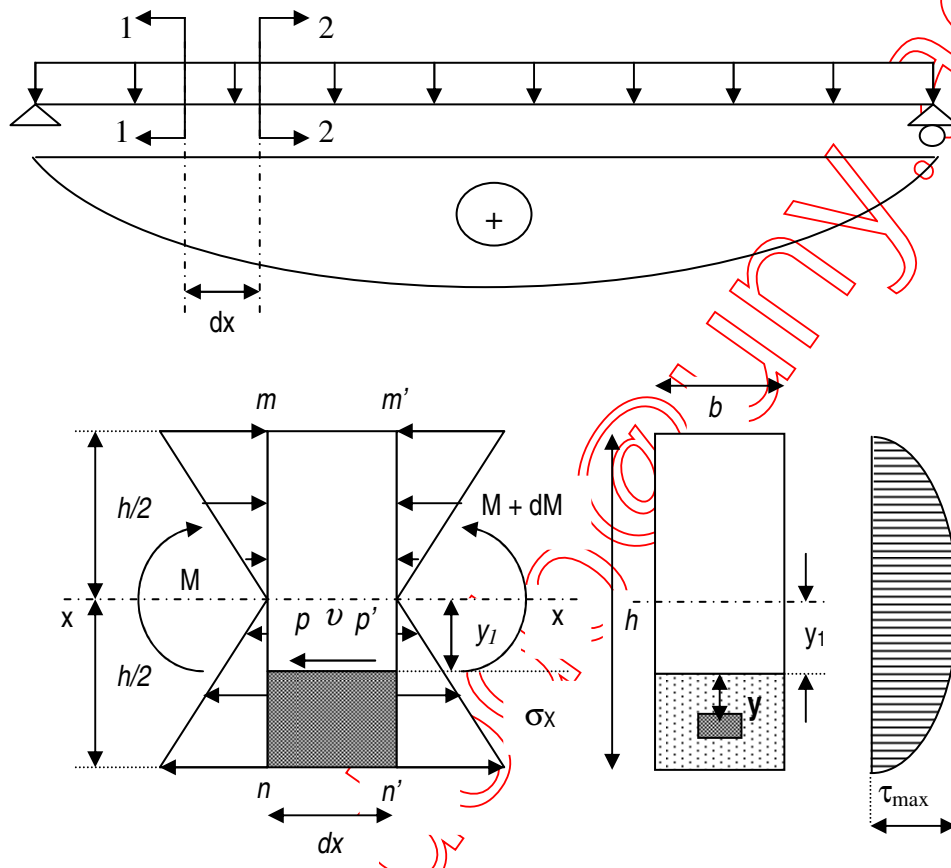
Pada umumnya elemen-elemen pada struktur beton bertulang tidak dapat dihindarkan dari pengaruh gaya geser. Komponen gaya ini biasanya bekerja secara bersamaan dengan momen lentur, beban aksial, dan bisa juga momen puntir (torsi). Penjalaran gaya geser pada beton sangat tergantung pada kuat tarik dan kuat tekan beton. Hal ini berakibat fenomena gagal geser pada beton terjadi secara tidak daktail sehingga harus diusahakan perkuatan guna menghindari terjadinya kegagalan geser pada struktur beton bertulang karena sangat dimungkinkan gagal geser terjadi secara mendadak sehingga sangat membahayakan. Konsep ini diterapkan secara tegas dalam perencanaan bangunan tahan gempa yang sangat mengutamakan daktilitas struktur, pada perencanaan ini harus dipastikan bahwa tidak akan terjadi kegagalan geser pada setiap elemennya.

Penerapan konsep klasik tentang tegangan geser pada material elastis, homogen, dan isotropis sampai saat ini masih dapat diterima dalam penyelesaian masalah geser pada elemen beton bertulang meskipun telah banyak pula dilakukan berbagai penelitian untuk mendapatkan formulasi yang lebih sesuai berkaitan dengan terbentuknya retakan dan kekuatan beton bertulang dalam menerima pengaruh gaya geser.

A. Konsep Dasar dalam Analisis Geser

Analisis tegangan geser dapat dimulai dengan melakukan tinjauan terhadap keseimbangan gaya pada sebuah elemen $p-p'-n'-n$, yang merupakan potongan dari sebuah balok dengan dua bagian potongan penampang yaitu $m-n$ dan $m'-n'$ dengan jarak dx dalam arah longitudinal (searah bentangan balok). Permukaan bawah elemen ($n-n'$) adalah permukaan terbawah dari penampang balok, sedangkan permukaan atasnya ($p-p'$) sejajar dengan garis netral dengan jarak y_1 . Pada permukaan atas ($p-p'$) bekerja tegangan geser τ , sedangkan pada kedua

permukaan ($m-n$ dan $m'-n'$) bekerja tegangan lentur normal σ_x , seperti terlihat pada Gambar 5-1.



Gambar 5-1 Tegangan Geser pada Balok

Pada umumnya struktur balok akan memiliki nilai momen lentur yang berbeda-beda menurut fungsi jaraknya, sehingga pada Gambar 5-1 ditunjukkan momen lentur “ M ” pada tampang $m-n$ dan sebesar “ $M + dM$ ” pada tampang $m'-n'$. Dengan meninjau bagian elemen seluas dA berjarak y dari garis netral, apabila elemen luasan ini terletak di sebelah kiri $p-n$ maka besarnya gaya normal yang bekerja adalah :

$$\sigma_x \cdot dA = \frac{M \cdot y}{I} \cdot dA \quad (5-1)$$

Penjumlahan gaya-gaya elemen yang bekerja melalui luas tampang $p-n$ memberikan gaya total F_1 , yang dapat dihitung dengan :

$$F_1 = \int \frac{M \cdot y}{I} \cdot dA \quad (5-2)$$

Integrasi Persamaan di atas dilakukan dengan batasan $y = y_1$ sampai dengan $y = h/2$. Analog dengan cara di atas maka dapat dihitung besarnya gaya total di sebelah kanan permukaan $p'-n'$ menggunakan Persamaan berikut :

$$F_2 = \int \frac{(M + dM) \cdot y}{I} \cdot dA \quad (5-3)$$

Berikutnya dapat dihitung besarnya gaya horisontal yang bekerja di atas permukaan $p-p'$, yang besarnya adalah :

$$F_3 = v \cdot b \cdot dx \quad (5-4)$$

di mana b merupakan lebar balok dan dx merupakan panjang potongan dalam arah longitudinal.

Gaya-gaya F_1 , F_2 dan F_3 harus memenuhi prinsip keseimbangan gaya, sehingga keseimbangan gaya dalam arah horisontal dapat dinyatakan dalam Persamaan :

$$F_1 = F_2 - F_3 \quad (5-5)$$

atau

$$\tau \cdot b \cdot dx = \int \frac{(M + dM) \cdot y}{I} \cdot dA - \int \frac{M \cdot y}{I} \cdot dA ; \text{ sehingga diperoleh :}$$

$$v = \frac{dM}{dx} \cdot \left(\frac{1}{I \cdot b} \right) \cdot \int y \cdot dA \quad (5-6)$$

Dengan mensubstitusikan $V = \frac{dM}{dx}$, dan $S_x = M_x^1 = \int_A y \cdot dA$, maka tegangan geser

dapat dihitung dengan

$$v = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (5-7)$$

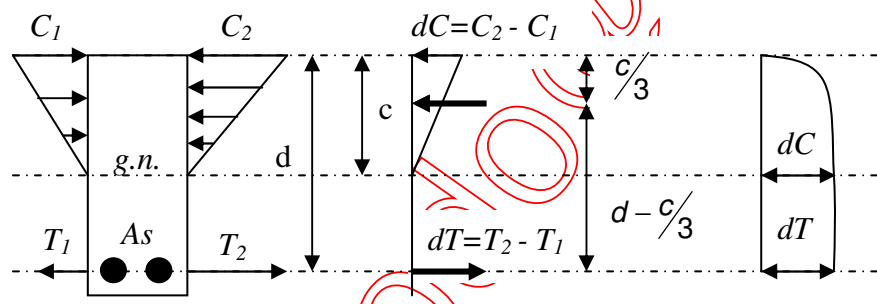
Harus diingat bahwa pada Persamaan (5-7.) di atas, nilai “ τ ” mewakili tegangan geser pada arah longitudinal (x) dan transversal (b yang searah sumbu z), maka besarnya gaya geser per satuan panjang yang terjadi dalam arah longitudinal dapat dihitung dengan :

$$q = v \cdot b = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \cdot b \quad (5-8)$$

$$q = \frac{V \cdot S}{I} = \frac{V}{z} \quad (5-9)$$

dimana $z = \frac{I}{S_x}$, merupakan besaran modulus tampang.

Para peneliti di bidang beton bertulang selanjutnya berusaha menyesuaikan konsep klasik diatas dengan idealisasi penampang beton bertulang yang telah mengalami retak. Gambar 5-2 menunjukkan komponen gaya horisontal yang dialirkan pada daerah retakan besarnya selalu konstan, sehingga besarnya aliran geser pada daerah tarik selalu konstan dan terdapat selisih gaya tarik pada kedua potongan (potongan 1-1 dan 2-2) sebesar dT .



Gambar 5-2 Analogi Geser Balok Beton Bertulang

Pada gambar 5-2 dapat dilihat bahwa di bawah garis netral terjadi gaya geser sebesar:

$$dC = dT = T_2 - T_1 = \frac{M_2}{(d - c/3)} - \frac{M_1}{(d - c/3)} \quad (5-10)$$

$$dC = \frac{(M_2 - M_1)}{(d - c/3)} \quad (5-11)$$

dengan mensubstitusikan nilai $M_2 - M_1 = V \cdot dx$, maka:

$$dC = \frac{(V \cdot dx)}{(d - c/3)} \quad (5-12)$$

dengan lebar balok (b) maka tegangan geser beton yang terjadi di bawah garis netral sebesar:

$$v = \frac{dC}{b \cdot dx} = \frac{V \cdot dx}{dx \cdot b \cdot (d - c/3)} = \frac{V}{b \cdot (d - c/3)} \quad (5-13)$$

dengan alasan besaran $\frac{c}{3}$ bervariasi dan nilainya sangat kecil sehingga dapat diabaikan maka:

$$v = \frac{V}{b.d} \quad (5-14)$$

dimana:

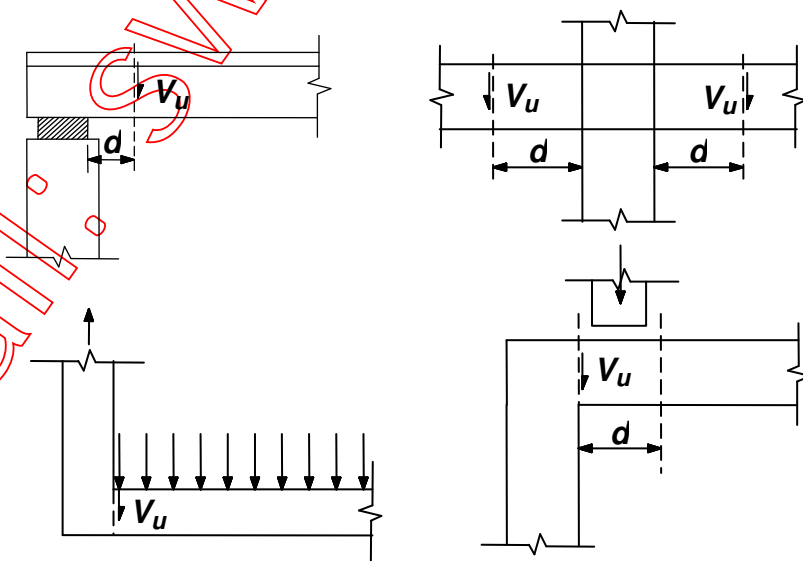
V = tegangan geser beton (MPa)

b = lebar balok (mm)

d = jarak antara sisi luar beton tertekan dan tulangan tarik (mm)

Hal ini membuktikan bahwa pengaruh geser pada balok beton bertulang sangat dipengaruhi ukuran penampang melintang (b dan d). Bekerjanya beban transversal selalu mengakibatkan timbulnya pengaruh geser sampai pada suatu nilai pembebanan tertentu dicapai tahapan kritis, dimana jika tetap dilakukan penambahan beban maka akan terjadi kegagalan struktur.

Untuk keperluan perancangan geser pada komponen struktur non-pratekan, SNI 03-2847-2002 mengizinkan penampang yang jaraknya kurang daripada d dari muka tumpuan boleh direncanakan terhadap gaya geser V_u yang nilainya sama dengan gaya geser yang dihitung pada titik sejarak d . Ketentuan diatas boleh dipergunakan jika: (1) leban bekerja pada atau dekat permukaan atas komponen struktur, (2) tidak ada beban terpusat bekerja di antara muka tumpuan dan lokasi penampang kritis yang didefinisikan



Gambar 5-3 Lokasi geser maksimum untuk perencanaan

B. Kekuatan Geser Nominal

Komponen struktur, kecuali komponen struktur-lentur-tinggi, yang menerima beban geser harus direncanakan menurut ketentuan berikut:

Perencanaan penampang terhadap geser harus didasarkan pada:

$$V_u \leq \phi \cdot V_n \quad (5-15)$$

dengan

V_u = gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau

ϕ = factor reduksi kekuatan (0,75)

V_n = kuat geser nominal yang dihitung dari:

$$V_n = V_c + V_s \quad (5-16)$$

dengan

V_c = kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton

V_s = kuat geser nominal yang disumbangkan oleh tulangan geser

1. Kekuatan geser nominal beton

Sesuai dengan sifat beban yang bekerja pada komponen struktur non-pratekan, maka kuat geser V_c yang disumbangkan oleh beton ditentukan sebagai berikut:

a) Untuk komponen struktur yang dibebani geser dan lentur berlaku,

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) b_w d \quad (5-17)$$

atau dapat juga dihitung secara rinci dengan ketentuan:

$$V_c = \left(\sqrt{f'_c} + 120 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) \frac{b_w d}{7} \quad (5-18)$$

tetapi tidak boleh diambil lebih besar daripada $0,3\sqrt{f'_c} b_w d$. Besaran $V_u d/M_u$ tidak boleh diambil melebihi 1,0, di mana M_u adalah momen terfaktor yang terjadi bersamaan dengan V_u pada penampang yang ditinjau.

- b) Untuk komponen struktur yang dibebani tekan aksial,

$$V_c = \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \left(\frac{\sqrt{f_c'}}{6} \right) b_w d \quad (5-19)$$

Besaran N_u/A_g harus dinyatakan dalam MPa.

atau dapat juga dihitung secara rinci dengan ketentuan:

Persamaan (5-18) boleh digunakan untuk menghitung V_c dengan nilai M_m menggantikan nilai M_u dan nilai $V_u d/M_u$ boleh diambil lebih besar daripada 1,0, dengan

$$M_m = M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8} \quad (5-20)$$

Tetapi dalam hal ini, V_c tidak boleh diambil lebih besar daripada:

$$V_c = 0,3 \sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,3N_u}{A_g}} \quad (5-21)$$

Besaran N_u/A_g harus dinyatakan dalam MPa. Bila M_m yang dihitung dengan Persamaan (5-20) bernilai negatif, maka V_c harus dihitung dengan Persamaan (5-21).

- c) Untuk komponen struktur yang dibebani oleh gaya tarik aksial yang cukup besar, tulangan geser harus direncanakan untuk memikul gaya geser total yang terjadi, kecuali bila dihitung secara lebih rinci sesuai dengan ketentuan:

$$V_c = \left(1 + \frac{0,3N_u}{A_g} \right) \frac{\sqrt{f_c'}}{6} b_w d \quad (5-22)$$

tapi tidak kurang daripada nol, dengan N_u adalah negatif untuk tarik. Besaran N_u/A_g harus dinyatakan dalam MPa.

Dalam menggunakan persamaan-persamaan di atas, harus diperhatikan bahwa nilai $\sqrt{f'_c}$ yang digunakan di dalamnya tidak boleh melebihi 25/3 MPa, dan untuk komponen struktur bundar, luas yang digunakan untuk menghitung V_c harus diambil sebagai hasil kali dari diameter dan tinggi efektif penampang. Tinggi efektif penampang boleh diambil sebagai 0,8 kali diameter penampang beton.

2. Kekuatan nominal tulangan geser

Jenis-jenis tulangan geser yang dapat digunakan sebagai tulangan geser terdiri dari:

- senggang yang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur,
- jaring kawat baja las dengan kawat-kawat yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur,
- spiral, senggang ikat bundar atau persegi.

Untuk komponen struktur non-pratekan, tulangan geser dapat juga terdiri dari:

- senggang yang membuat sudut 45° atau lebih terhadap tulangan tarik longitudinal.
- tulangan longitudinal dengan bagian yang dibengkokkan untuk membuat sudut sebesar 30° atau lebih terhadap tulangan tarik longitudinal.
- kombinasi dari senggang dan tulangan longitudinal yang dibengkokkan.
- spiral.

Bila gaya geser terfaktor V_u lebih besar daripada kuat geser ϕV_c , maka harus disediakan tulangan geser untuk memenuhi persamaan (5-15) dan (5-16).

- Untuk penggunaan tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur, maka

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (5-23)$$

dengan A_v adalah luas tulangan geser yang berada dalam rentang jarak s .

Bila sengkang ikat bundar, sengkang ikat persegi, atau spiral digunakan sebagai tulangan geser, maka V_s harus dihitung menggunakan Persamaan (5-23), luas yang digunakan untuk menghitung V_c harus diambil sebagai hasil kali dari diameter dan tinggi efektif penampang. Tinggi efektif penampang boleh diambil sebagai 0,8 kali diameter penampang beton. Nilai A_v harus diambil sebagai dua kali luas batang tulangan pada sengkang ikat bundar, sengkang ikat persegi, atau spiral dengan spasi s , dan f_{yt} adalah kuat leleh tegangan sengkang ikat bundar, sengkang ikat persegi, atau spiral.

- b) Bila sebagai tulangan geser digunakan sengkang miring, maka

$$V_s = \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{s} \quad (5-24)$$

Dalam hal perencanaan kekuatan geser beton bertulang dengan formulasi di atas, kuat leleh rencana tulangan geser tidak boleh diambil lebih daripada 400 MPa, kecuali untuk jaring kawat baja las, kuat leleh rencananya tidak boleh lebih daripada 550 MPa.

3. Kebutuhan penulangan geser

- a) Jika $V_u \leq 0,50 \cdot \phi V_c$ (5-25)

untuk kasus ini tidak diperlukan tulangan geser

- b) Jika $0,50 \cdot \phi V_c \leq V_u \leq \phi V_c$ (5-26)

untuk kasus ini diperlukan tulangan geser minimum, kecuali untuk pelat, pondasi telapak, dan balok dengan tinggi total yang tidak lebih dari nilai terbesar di antara 250 mm, 2,5 kali tebal sayap, atau 0,5 kali lebar badan.

Perkuatan geser yang diperlukan untuk kasus ini sebesar:

$$\text{jarak sengkang } (s) \text{ maksimum } \leq d/2 \leq 600 \text{ mm} \quad (5-28)$$

$$\text{luas tulangan geser minimum } A_v = \frac{b_w \cdot s}{3 \cdot f_y} \quad (5-29)$$

- c) Jika $\phi V_c < V_u \leq \left[\phi V_c + \phi \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{3} \right) \cdot b_w \cdot d \right]$ (5-30)

untuk kasus ini diperlukan tulangan geser dengan kuat geser perlu yang dihitung sebagai berikut:

$$\phi V_{s\text{perlu}} = V_u - \phi V_c \quad (5-31)$$

$$\phi V_{s\text{ada}} = \frac{\phi A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (\text{untuk } \alpha=90^\circ) \quad (5-32)$$

$$\text{jarak sengkang } (s) \text{ maksimum } \leq d/2 \leq 600 \text{ mm} \quad (5-33)$$

d) Jika $\left[\phi V_c + \phi \left(\frac{\sqrt{f'c}}{3} \right) \cdot b_w \cdot d \right] < V_u \leq \left[\phi V_c + \phi \left(\frac{2\sqrt{f'c}}{3} \right) \cdot b_w \cdot d \right]$ (5-34)

untuk kasus ini diperlukan tulangan geser dengan kuat geser perlu yang dihitung menurut Persamaan (5-31) dan (5-32) dengan;

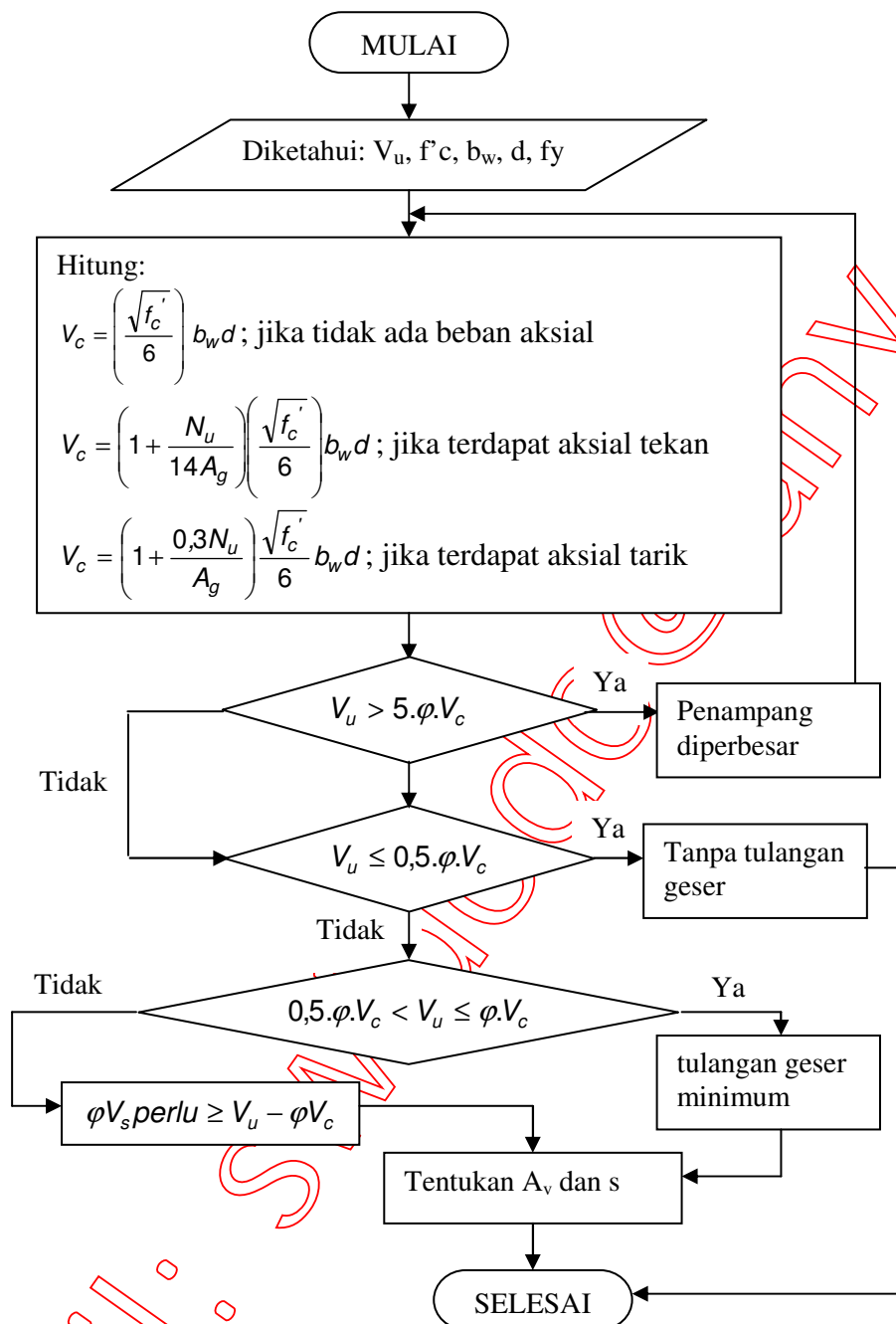
$$\text{jarak sengkang } (s) \text{ maksimum } \leq d/4 \leq 300 \text{ mm} \quad (5-35)$$

e) Jika $V_u > \left[\phi V_c + \phi \left(\frac{2\sqrt{f'c}}{3} \right) \cdot b_w \cdot d \right]$ (5-36)

untuk kasus ini ukuran penampang melintang beton harus diperbesar sedemikian hingga dicapai:

$$V_u \leq \left[\phi V_c + \phi \left(\frac{2\sqrt{f'c}}{3} \right) \cdot b_w \cdot d \right] \quad (5-37)$$

Langkah-langkah dalam perencanaan kekuatan geser beton bertulang disajikan pada Gambar 5-4.

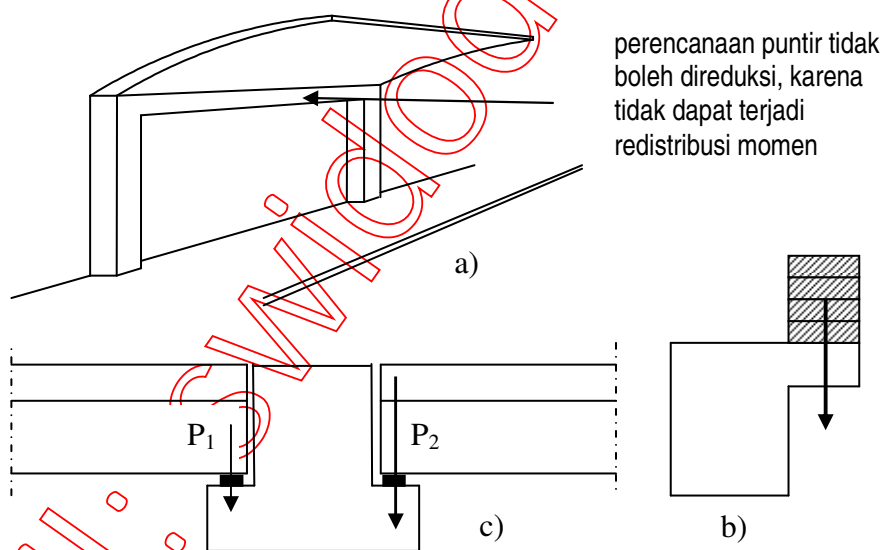


Gambar 5-4 Bagan Alir Perencanaan Geser

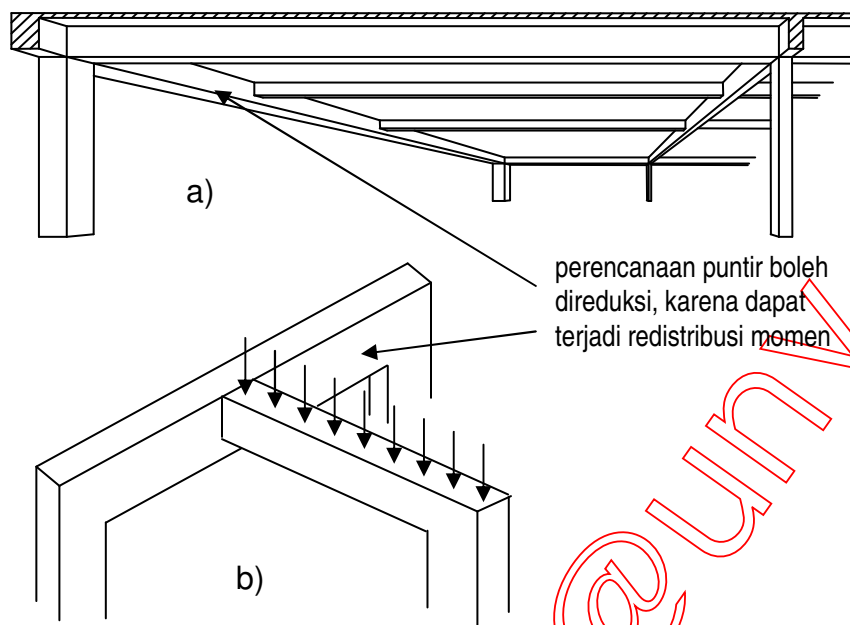
Elemen-elemen struktural pada umumnya difungsikan untuk mengganggu berbagai macam beban layan yang mengakibatkan bekerjanya gaya-gaya dalam yang berupa momen lentur, gaya aksial, gaya geser, dan seringkali dijumpai pula bekerjanya momen puntir (torsi). Torsi dapat didefinisikan sebagai peristiwa bekerjanya momen puntir di sepanjang batang yang mengakibatkan terpilinnya

elemen struktur dalam arah longitudinal. Pada prinsipnya torsi dapat terjadi karena bekerjanya beban transversal yang tidak segaris dengan posisi garis berat penampang. Dalam perhitungan beton bertulang, torsi dibedakan menjadi dua macam, yaitu: (1) torsi keseimbangan dan (2) torsi keselarasan yang dibedakan atas dasar pemicu terjadinya puntiran pada elemen struktur yang dianalisis.

Torsi keseimbangan adalah jenis puntiran pada elemen beton bertulang yang disebabkan bekerjanya aksi primer, artinya titik tangkap beban yang bekerja pada elemen yang ditinjau secara individual memang tidak segaris dengan posisi garis berat penampang. Hal ini berakibat terpilinnya elemen struktur yang hanya bisa ditahan oleh kekuatan elemen yang bersangkutan dalam menahan momen puntir, sehingga dapat memenuhi prinsip keseimbangan (aksi sama dengan reaksi). Fenomena torsi semacam ini dijumpai pada jenis struktur statis tertentu.



Gambar 5-5 Fenomena Torsi Keseimbangan



Gambar 5-6 Fenomena Torsi Keselarasan

Torsi keselarasan adalah jenis puntiran pada elemen beton bertulang yang disebabkan bekerjanya aksi sekunder. Jenis torsi ini terjadi karena adanya kesinambungan antar elemen struktur yang disatukan secara monolith (kaku sempurna) pada sambungan-sambungannya sehingga dalam pergerakan sistem struktur terjadi dengan mengikuti prinsip keselarasan (*compatibility*). Hal ini berakibat bekerjanya beban pada suatu elemen akan mempengaruhi kinerja elemen struktur yang lain. Fenomena torsi semacam ini dijumpai pada jenis struktur statis tak tertentu, contoh nyata yang paling mudah diamati pada struktur bangunan gedung adalah fenomena puntir yang terjadi pada balok tepi (eksterior).

Momen torsi dalam balok menimbulkan tegangan geser torsi sehingga secara akumulatif menambah besaran tegangan geser yang ditimbulkan akibat pengaruh geser lentur. Torsi menyebabkan timbulnya tegangan-tegangan geser memicu terjadinya tegangan tarik miring yang membentuk sudut kira-kira 45° terhadap sumbu memanjang dari elemen struktur, dan apabila tegangan tarik yang terjadi melampaui kekuatan tarik beton maka akan terjadi retak-retak diagonal menyerupai spiral di sekeliling elemen tersebut.

Pengaruh torsi dalam elemen struktur pada umumnya terjadi secara bersamaan dengan efek geser, maka secara otomatis tulangan torsi bisa digabungkan dengan tulangan geser.

C. Perencanaan Kekuatan Puntir

Pengaruh puntir dapat diabaikan bila nilai momen puntir terfaktor T_u besarnya kurang daripada:

untuk komponen struktur non-pratekan:

$$\frac{\phi\sqrt{f'_c}}{12} \left(\frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \right) \quad (5-38)$$

untuk komponen struktur pratekan:

$$\frac{\phi\sqrt{f'_c}}{12} \left(\frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{3f_{pc}}{\sqrt{f'_c}}} \quad (5-39)$$

Untuk komponen struktur yang dicor secara monolit dengan pelat, lebar bagian sayap penampang yang digunakan dalam menghitung A_{cp} dan p_{cp} harus sesuai dengan ketentuan berikut:

- untuk balok T maka $b = b_w + 2(3.h_f)$;
- untuk balok L maka $b = b_w + (3.h_f)$.

1. Perhitungan momen puntir terfaktor T_u

Bila momen puntir terfaktor T_u pada suatu komponen struktur diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan (struktur statis tertentu), dan nilainya melebihi nilai minimum yang diberikan pada Persamaan (5-38) untuk beton bertulang dan Persamaan (5-39) untuk beton pratekan, maka komponen struktur tersebut harus direncanakan untuk memikul momen puntir sesuai dengan ketentuan dalam SNI 03-2847-2002 Butir 11.6(3) hingga Butir 11.6(6).

Pada struktur statis tak tentu dimana dapat terjadi pengurangan momen puntir pada komponen strukturnya yang disebabkan oleh redistribusi gaya-gaya dalam akibat adanya keretakan (Gambar 5-6), momen puntir terfaktor maksimum T_u dapat dikurangi menjadi:

untuk komponen struktur non-pratekan:

$$\phi \frac{\sqrt{f_c'}}{3} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (5-40)$$

penampang-penampang yang berada dalam jarak d dari muka tumpuan dapat direncanakan terhadap momen puntir T_u yang bekerja pada penampang sejarak d dari muka tumpuan. Jika terdapat beban puntir terpusat yang bekerja di dalam rentang jarak d tersebut, maka penampang kritis untuk perencanaan haruslah diambil pada muka tumpuan.

untuk komponen struktur pratekan:

$$\phi \frac{\sqrt{f_c'}}{3} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{3f_{pc}}{\sqrt{f_c'}}} \quad (5-41)$$

penampang-penampang yang berada dalam jarak $h/2$ dari muka tumpuan dapat direncanakan terhadap momen puntir T_u yang bekerja pada penampang sejarak $h/2$ dari muka tumpuan. Jika terdapat beban puntir terpusat yang bekerja di dalam rentang jarak $h/2$ tersebut, maka penampang kritis untuk perencanaan haruslah diambil pada muka tumpuan.

Dalam hal ini, nilai-nilai momen lentur dan geser yang telah didistribusikan pada komponen struktur yang berhubungan dengan komponen struktur yang ditinjau harus digunakan dalam perencanaan komponen struktur tersebut, sedangkan beban puntir dari suatu pelat boleh dianggap terdistribusi merata di sepanjang komponen yang ditinjau kecuali bila dilakukan analisis yang lebih eksak.

2. Kuat lentur puntir

Dimensi penampang melintang harus memenuhi ketentuan berikut:

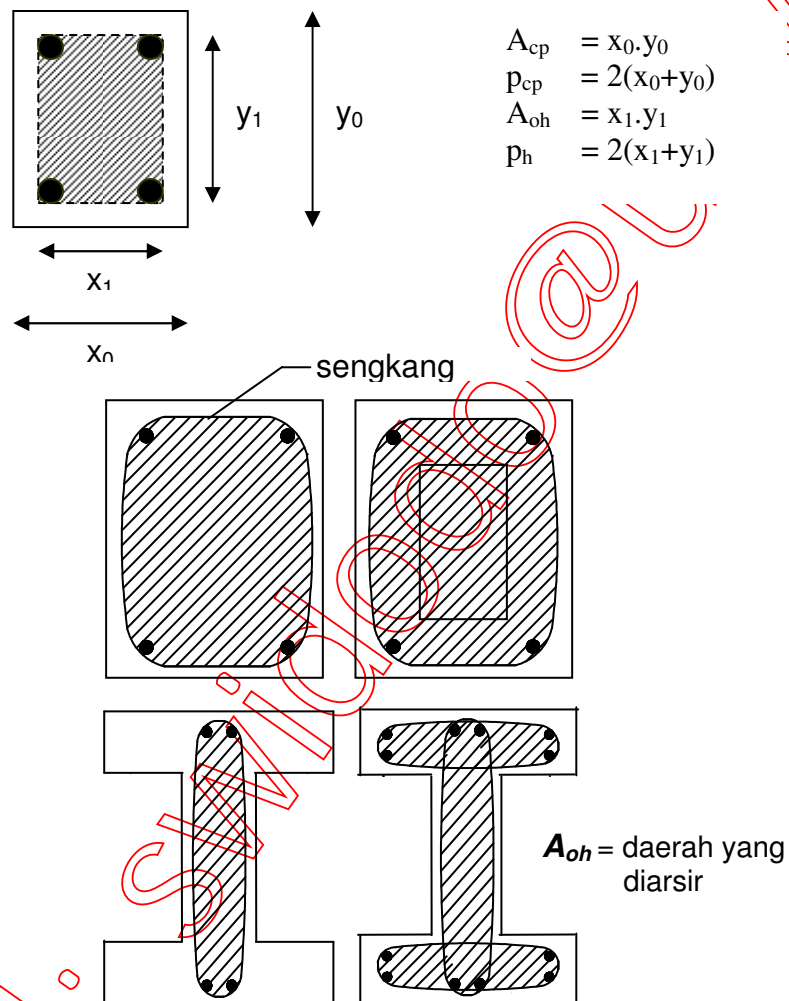
untuk penampang solid:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2} \right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + \frac{2\sqrt{f_c'}}{3} \right) \quad (5-42)$$

untuk penampang berongga:

$$\left(\frac{V_u}{b_w d} \right) + \left(\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2} \right) \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + \frac{2\sqrt{f_c'}}{3} \right) \quad (5-43)$$

A_{oh} dapat ditentukan berdasarkan Gambar 5-7



Gambar 5-7 Definisi Parameter Torsi Beton Bertulang

Jika tebal dinding bervariasi di seputar garis keliling penampang berongga, maka Pers. (5-43) harus dievaluasi pada lokasi dimana ruas kiri Pers. (5-43) mencapai nilai maksimum, sedangkan apabila tebal dinding adalah kurang daripada A_{oh}/p_h , maka nilai suku kedua pada Pers. (5-43) harus diambil sebesar

$$\left(\frac{T_u}{1,7 A_{oh} t} \right) \quad (5-44)$$

dengan t adalah tebal dinding penampang berongga pada lokasi di mana tegangannya yang sedang diperiksa.

Tulangan yang dibutuhkan untuk menahan puntir harus ditentukan dari:

$$\phi T_n \geq T_u \quad (5-45)$$

dengan T_u adalah momen puntir terfaktor pada penampang yang ditinjau dan T_n adalah kuat momen puntir nominal penampang. Dalam kondisi aktual kuat puntir nominal penampang (T_n) sesungguhnya disumbangkan oleh kuat puntir nominal beton (T_c) dan kuat momen puntir nominal tulangan puntir (T_s), tetapi dengan alasan penyederhaan desain maka besaran T_c diasumsikan sama dengan nol sehingga dapat diabaikan.

Tulangan sengkang untuk puntir harus direncanakan berdasarkan persamaan berikut:

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yv}}{s} \cot \theta \quad (5-46)$$

dengan

A_o , kecuali ditentukan berdasarkan analisis, dapat diambil sebesar $0,85 A_{oh}$, dan kuat leleh rencana untuk tulangan puntir non-pratekan tidak boleh melebihi 400 MPa.

Nilai θ tidak boleh kurang daripada 30 derajat dan tidak boleh lebih besar daripada 60 derajat. Nilai θ boleh diambil sebesar:

a) 45 derajat untuk komponen struktur non-pratekan atau komponen struktur pratekan dengan nilai pratekan yang besarnya tidak melebihi ketentuan pada Butir di bawah ini,

b) 37,5 derajat untuk komponen struktur pratekan dengan gaya pratekan efektif tidak kurang daripada 40 persen kuat tarik tulangan longitudinal.

Tulangan longitudinal tambahan yang diperlukan untuk menahan puntir tidak boleh kurang daripada:

$$A_t = \frac{A_t}{s} p_h \left(\frac{f_{yv}}{f_{yt}} \right) \cot^2 \theta \quad (5-47)$$

dengan θ adalah nilai yang sama dengan nilai yang digunakan dalam Pers. (5-46) dan A_t/s harus dihitung dari Pers. (5-46).

Tulangan untuk menahan puntir harus disediakan sebagai tambahan terhadap tulangan yang diperlukan untuk menahan gaya-gaya geser, lentur, dan aksial yang bekerja secara kombinasi dengan gaya puntir. Dalam hal ini, persyaratan yang lebih ketat untuk spasi dan penempatan tulangan harus dipenuhi.

3. Ketentuan tulangan puntir minimum

Luas minimum tulangan puntir harus disediakan pada daerah dimana momen puntir terfaktor T_u melebihi nilai yang disyaratkan pada Persamaan (5-38) atau (5-39).

Bilamana diperlukan tulangan puntir berdasarkan ketentuan di atas, maka luas minimum tulangan sengkang tertutup harus dihitung dengan ketentuan:

$$A_v + 2A_t = \frac{75 \sqrt{f'_c} b_w s}{1200 f_{yv}} \quad (5-48)$$

namun $(A_v + 2A_t)$ tidak boleh kurang dari $\frac{1 b_w s}{3 f_{yv}}$.

sedangkan luas total minimum tulangan puntir longitudinal harus dihitung dengan ketentuan:

$$A_{l,min} = \frac{5 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{12 f_{yl}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) p_h \frac{f_{yv}}{f_{yl}} \quad (5-49)$$

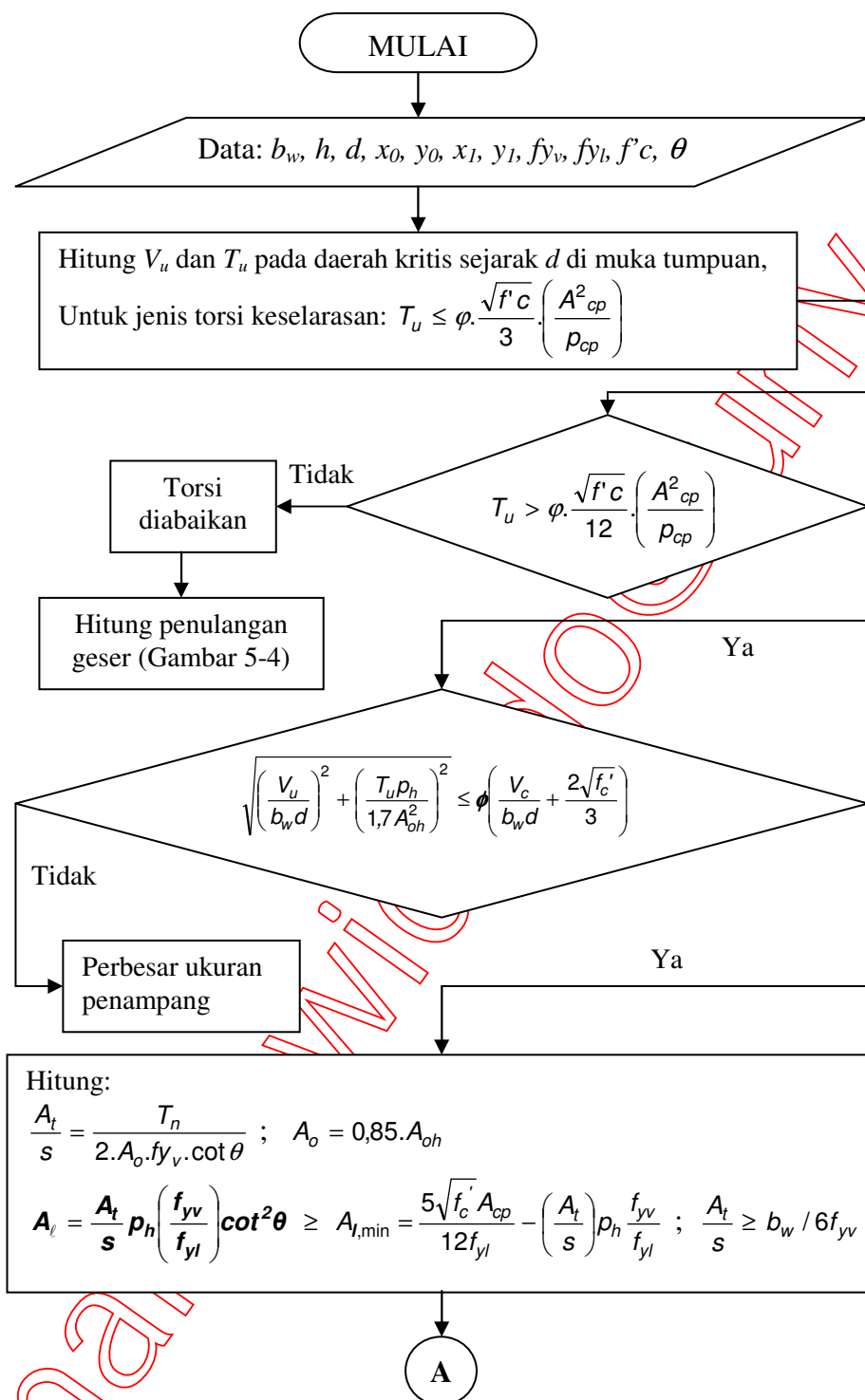
dengan $\frac{A_t}{s}$ tidak kurang dari $b_w / 6 f_{yv}$.

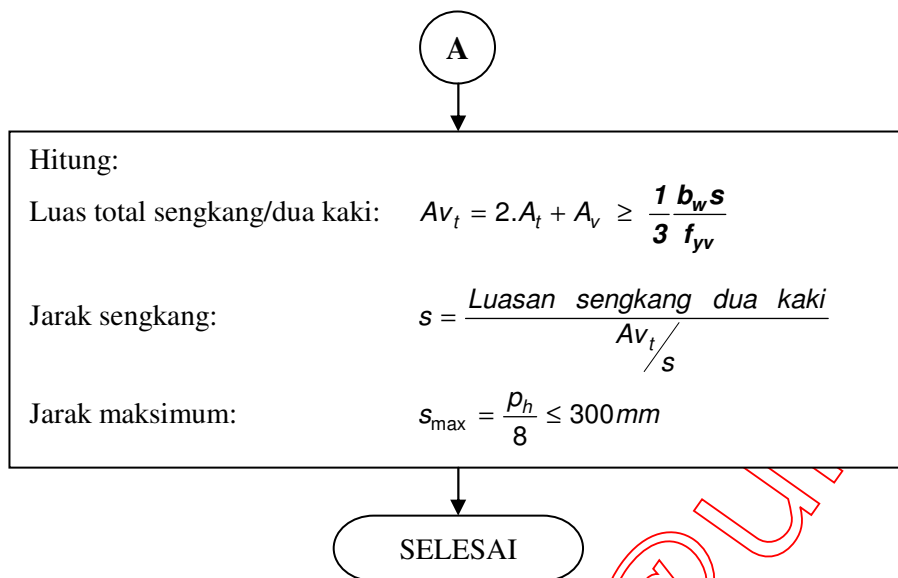
4. Spasi tulangan puntir

Dalam pemasangan tulangan puntir harus diperhatikan ketentuan-ketentuan berikut:

- a) Spasi tulangan sengkang puntir tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $p_n/8$ atau 300 mm.
- b) Tulangan longitudinal yang dibutuhkan untuk menahan puntir harus didistribusikan di sekeliling perimeter sengkang tertutup dengan spasi tidak melebihi 300 mm. Batang atau tendon longitudinal tersebut harus berada di dalam sengkang. Pada setiap sudut sengkang tertutup harus ditempatkan minimal satu batang tulangan atau tendon longitudinal. Diameter batang tulangan longitudinal haruslah minimal sama dengan $1/24$ spasi sengkang, tetapi tidak kurang daripada 10 mm.
- c) Tulangan puntir harus dipasang melebihi jarak minimal $(b_t + d)$ di luar daerah dimana tulangan puntir dibutuhkan secara teoritis.

Langkah-langkah perencanaan puntir pada balok beton bertulang disajikan dalam Gambar 5-8.



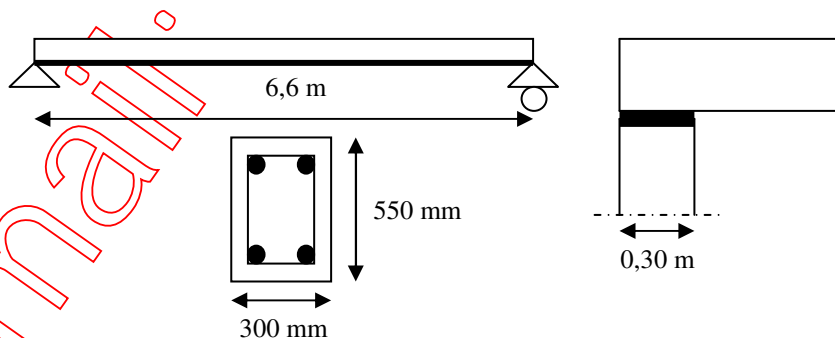


Gambar 5-8 Bagan Alir Perencanaan Torsi Beton Bertulang Solid

D. Contoh-Contoh Aplikasi

Contoh 5-1

Rencanakan penulangan geser dengan sengkang vertikal yang dibutuhkan untuk balok dengan tumpuan sederhana seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Elemen balok tersebut memiliki bentang (L) 6,6 m, lebar tumpuan 0,30 m, lebar balok (b_w) 300 mm, tinggi balok (h) 550 mm, selimut beton 40 mm, diameter sengkang 10 mm, dan diameter tulangan pokok 22 mm, kuat tekan karakteristik beton (f'_c) 25 MPa dan kuat leleh baja (f_y) 400 MPa. Beban yang bekerja berupa beban mati (q_{DL}) sebesar 3 t/m (termasuk berat sendiri) dan beban hidup (q_{LL}) sebesar 2,5 t/m.



Penyelesaian: (Cara perencanaan sesuai bagan alir pada Gambar 5-4)

Hitung perkiraan tinggi efektif balok (d)

$$d = 550 - 40 - 10 - \frac{22}{2} = 489 \text{ mm}$$

Posisi penampang kritis sejarak d di muka tumpuan,

$$\left(\frac{0,30}{2} + 0,489 = 0,639 \text{ m} \right) \approx 0,600 \text{ m dari ujung bentang teoritis.}$$

Hitung besaran gaya geser yang menentukan

$$\begin{aligned} V_{DL} &= \frac{q_{DL} \cdot L}{2} - q_{DL} \cdot 0,600 \\ &= \frac{3.6,6}{2} - 3.0,600 = 8,1 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{LL} &= \frac{q_{LL} \cdot L}{2} - q_{LL} \cdot 0,600 \\ &= \frac{2,5.6,6}{2} - 2,5.0,600 = 6,75 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_u &= 1,2 \cdot V_{DL} + 1,6 \cdot V_{LL} \\ &= 1,2 \cdot 8,1 + 1,6 \cdot 6,75 = 20,52 \text{ ton} \\ &= 205,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hitung kapasitas geser beton

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \cdot b_w \cdot d = \frac{\sqrt{25}}{6} \cdot 300 \cdot 489 \\ &= 122250 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi \cdot V_c &= 0,75 \cdot 122250 \\ &= 91687,5 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3 \cdot \phi \cdot V_c &= 3 \cdot 91687,5 \\ &= 275062,5 \text{ N} \end{aligned}$$

Hitung spasi sengkang

$$91687,5 \text{ N} < 205200 \text{ N} < 275062,5 \text{ N}$$

$\phi \cdot V_c < V_u < 3 \cdot \phi \cdot V_c$ Diperlukan tulangan geser

$$\begin{aligned} \phi \cdot V_s &= V_u - \phi \cdot V_c \\ &= 205200 - 91687,5 = 113512,5 \text{ N} \end{aligned}$$

$$V_s = \frac{\phi \cdot V_s}{\phi} = \frac{113512,5}{0,75} = 151350 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} \\
 &= \frac{(2.0,25 \cdot \pi \cdot 10^2) \cdot 320 \cdot 489}{151350} \\
 &= 162,4038 \text{ mm} \\
 &\approx 150 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persyaratan spasi sengkang dapat ditentukan:

- Spasi sengkang untuk memenuhi syarat kekuatan = 150 mm
- Spasi sengkang maksimum = $\frac{d}{2} < 600 \text{ mm}$

$$\frac{d}{2} = \frac{489}{2} = 244,5 \text{ mm} \approx 240 \text{ mm}$$
- Spasi maksimum umum tulangan geser minimum

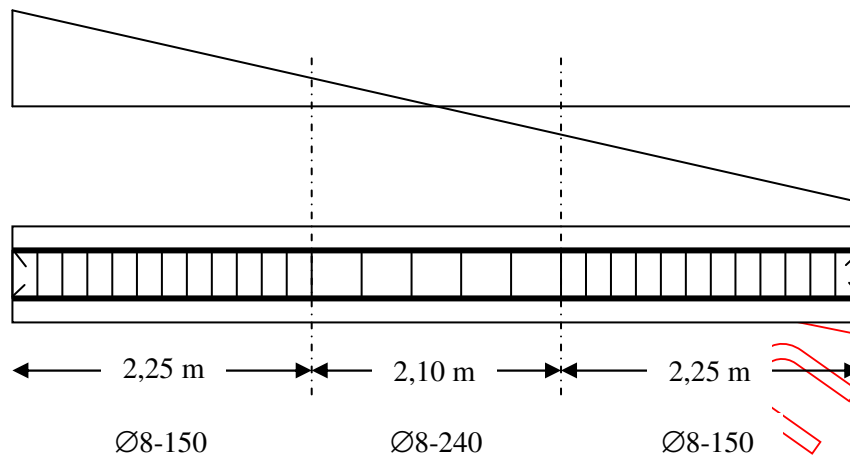
$$s = \frac{3 \cdot A_v \cdot f_y}{b_w} = \frac{3 \cdot (2.0,25 \cdot \pi \cdot 10^2) \cdot 320}{300} = 502,655 \text{ mm} \approx 500 \text{ mm}$$

Daerah batas perubahan spasi sengkang:

$$\begin{aligned}
 V_u &= \phi \cdot V_c = 91687,5 \text{ N} = 9,1689 \text{ ton} \\
 &= \frac{q_u \cdot L}{2} - q_u \cdot x \\
 x &= \frac{\left(\frac{(1,2 \cdot 3 + 1,6 \cdot 2,5) \cdot 6,6}{2} \right) - 9,1689}{(1,2 \cdot 3 + 1,6 \cdot 2,5)} = 2,09 \text{ m di muka tumpuan}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dapat ditentukan pemasangan sengkang untuk:

- Spasi sengkang untuk daerah dimana $V_u > \phi \cdot V_c$ (masing-masing berjarak 2,25 m dari kedua ujung tumpuan, baik sisi kanan maupun kiri) digunakan sengkang tertutup $\emptyset 10-150$
- Spasi sengkang untuk daerah dimana $V_u \leq \phi \cdot V_c$ (bagian tengah sepanjang 2,1 m) digunakan sengkang tertutup $\emptyset 10-240$



Contoh 5-2

Rencanakan tulangan geser untuk penampang kolom persegi berukuran $b_w = 300$ mm, $h = 450$ mm, dan $d = 400$ mm, menahan gaya aksial tekan 40 ton (beban mati), dan 25 ton (beban hidup). Gaya lintang yang bekerja sebesar 6 ton (beban mati) dan 4 ton (beban hidup). Material yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan karakteristik 20 MPa dan baja untuk tulangan geser berdiameter 8 mm dengan kuat leleh 400 MPa.

Penyelesaian: (Cara perencanaan sesuai bagan alir pada Gambar 5-4)

Hitung kapasitas geser beton

$$\begin{aligned} N_u &= 1,2 \cdot N_{DL} + 1,6 \cdot N_{LL} \\ &= 1,2 \cdot 40 + 1,6 \cdot 25 \\ &= 88 \text{ ton} \\ &= 880000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c &= \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6} \right) b_w d \\ &= \left(1 + \frac{88000}{14(300 \cdot 450)} \right) \left(\frac{\sqrt{20}}{6} \right) 300 \cdot 400 = 131088,0063 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot V_c = 0,75 \cdot 131088,0063 = 98316,0047 \text{ N}$$

Hitung kebutuhan tulangan geser

$$V_u = 1,2.V_{DL} + 1,6.V_{LL}$$

$$= 1,2.60000 + 1,6.40000 = 136000N$$

$\phi.V_c < V_u < 3.\phi.V_c$ Diperlukan tulangan geser

$$\phi.V_s = V_u - \phi.V_c$$

$$= 136000 - 98316,007 = 37683,99528N$$

$$V_s = \frac{37683,99528}{0,75} = 50245,327N$$

$$s = \frac{A_v.fy.d}{V_s}$$

$$= \frac{(2.0,25.\pi.8^2).320.400}{50245,327}$$

$$= 256,1027mm$$

$$\approx 250mm$$

Berdasarkan persyaratan spasi sengkang dapat disimpulkan

- Spasi sengkang untuk memenuhi syarat kekuatan = 250 mm
- Spasi sengkang maksimum = $\frac{d}{2} < 600mm$
- Spasi maksimum umum tulangan geser minimum

$$s = \frac{3.A_v.fy}{b_w} = \frac{3.(2.0,25.\pi.8^2).320}{300} = 321,6991mm \approx 320mm$$

Menurut perhitungan di atas, maka sengkang harus dipasang dengan jarak 200 mm ($\varnothing 8-200$).

Contoh 5-3

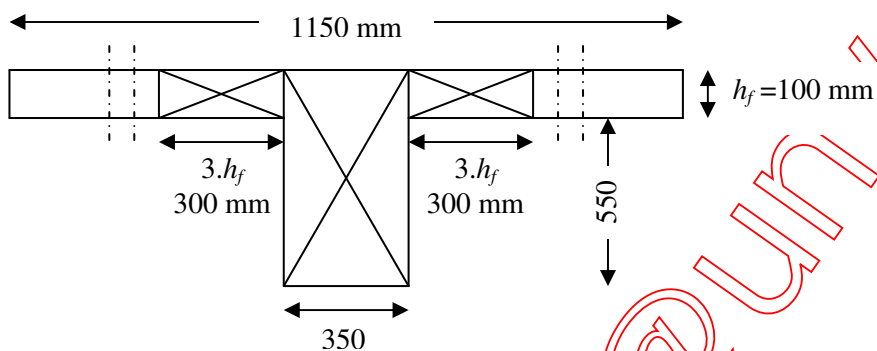
Rencanakan penulangan untuk penampang balok T dengan dimensi tergambar yang menerima beban geser terfaktor (V_u) sebesar 200 kN, dan momen torsi terfaktor:

- a) $T_u = 50$ kN.m (torsi keseimbangan)
- b) $T_u = 40$ kN.m (torsi keselarasan)

Jika digunakan tulangan lentur (A_s) = 4D25 (1963,495 mm²)

kuat tekan beton (f'_c) = 28 MPa

kuat leleh baja (f_y) = 400 MPa



Penyelesaian: (Cara perencanaan sesuai bagan alir pada Gambar 5-8)

Kasus (a)

Diasumsikan bagian sayap (flens) tidak menyatu secara monolith dengan bagian badan (web), maka:

$$A_{cp} = 350 \times 650 = 227500 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(350 + 650) = 2000 \text{ mm}$$

Catatan: jika dalam penyelesaian yang lain diasumsikan bagian sayap menyatu secara monolith dengan bagian badan, maka:

$$A_{cp} = 350 \times 650 + 2(300 \times 100) = 287500 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(350 + 650) + 2 \times 2(300 + 100) = 3600 \text{ mm}$$

Hitung batasan nilai momen torsi yang boleh diabaikan:

$$T_u \leq \phi \cdot \frac{\sqrt{f'_c}}{12} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$$

$$= 0,75 \cdot \frac{\sqrt{28}}{12} \left(\frac{287500^2}{3600} \right) = 7593329,228 \text{ N.mm} = 7,5933 \text{ kN.m}$$

$T_u = 50 \text{ kN.m} > 7,5933 \text{ kN.m}$ maka torsi harus diperhitungkan.

Hitung tahanan momen torsi yang diperlukan (T_n)

$$T_n = \frac{T_u}{\phi} = \frac{50 \text{ kN.m}}{0,75} = 66,6667 \text{ kN.m} = 66,6667 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

Hitung sifat-sifat tampang datar yang diperlukan

$A_o = 0,85 \cdot A_{oh}$, di mana A_{oh} merupakan bagian luasan penampang yang dibatasi garis berat sengkang tertutup. Jika diasumsikan diameter sengkang 10 mm dan selimut beton yang digunakan setebal 40 mm, maka:

$$x_1 = 350 - 2 \cdot (40 + 5) = 260 \text{ mm}$$

$$y_1 = 650 - 2 \cdot (40 + 5) = 560 \text{ mm}$$

$$A_{oh} = x_1 \cdot y_1 = 260 \cdot 560 = 145600 \text{ mm}^2$$

$$A_o = 0,85 \cdot A_{oh} = 0,85 \cdot 145600 = 123760 \text{ mm}^2$$

$$d = 650 - 40 - 10 - \frac{25}{2} = 587,5 \text{ mm}$$

$$p_h = 2 \cdot (x_1 + y_1) = 2 \cdot (260 + 560) = 1640 \text{ mm}$$

Nilai θ ditetapkan 45° karena merupakan komponen struktur non-pratekan, sehingga nilai $\cot \theta = 1,0$

Periksa kecukupan dimensi penampang menurut Persamaan (5-42)

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + \frac{2\sqrt{f'_c}}{3}\right)$$

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6}\right) \cdot b_w \cdot d = \left(\frac{\sqrt{28}}{6}\right) \cdot 350 \cdot 587,5 = 181344,2044 \text{ N}$$

$$\sqrt{\left(\frac{200000}{350 \cdot 587,5}\right)^2 + \left(\frac{50000000 \cdot 1640}{1,7 \cdot 145600^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{181344,2044}{350 \cdot 587,5} + \frac{2\sqrt{28}}{3}\right)$$

$2,4745 \text{ MPa} < 3,3073 \text{ MPa}$ Maka kuat lentur tampang mencukupi

Hitung kebutuhan tulangan torsi

$$\begin{aligned} \frac{A_s}{s} &= \frac{T_n}{2 \cdot A_o \cdot f_y \cdot \cot \theta} = \frac{66,6667 \times 10^6}{2 \cdot 123760 \cdot 400 \cdot 1,0} \\ &= 0,6735 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{satu kaki} \end{aligned}$$

Hitung kebutuhan tulangan geser

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'c}}{6} \right) \cdot b_w \cdot d = \left(\frac{\sqrt{28}}{6} \right) \cdot 350 \cdot 587,5 = 181344,2044 N$$

$$\phi \cdot V_c = 0,75 \cdot 181344,2044 = 136008,1533 N$$

$$V_{n,perlu} = \frac{V_u}{\phi} = \frac{200000}{0,75} = 266666,6667 N$$

dengan demikian $\phi \cdot V_c < V_u < 3 \cdot \phi \cdot V_c$, sehingga perlu tulangan geser

$$V_{s,perlu} = \frac{V_u}{\phi} - V_c = 266666,6667 - 181344,1533 = 85322,5134 N$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y \cdot d} = \frac{85322,5134}{400 \cdot 587,5} = 0,3631 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{dua kaki}$$

$$\frac{A_{vt}}{s} = \frac{2 \cdot A_t}{s} + \frac{A_v}{s} = 2 \cdot 0,6735 + 0,3631 = 1,7098 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{dua kaki}$$

dengan sengkang berdiameter 10 mm, maka luasan dua kaki

$$A_{\phi 10} = 0,25 \cdot \pi \cdot 10^2 \cdot 2 = 157,0796 \text{ mm}^2 / \text{dua kaki}$$

$$s = \frac{A_{\phi 10}}{\frac{A_{vt}}{s}} = \frac{157,0796}{1,7098} = 91,8705 \text{ mm} \approx 90 \text{ mm}$$

syarat pemasangan tulangan torsi:

$$s < s_{\max} = \frac{p_h}{8} \leq 300 \text{ mm}$$

$$90 < s_{\max} = \frac{1640}{8} = 205 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \quad \text{memenuhi syarat}$$

$$A_{vt} \geq \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_{yv}}$$

$$A_{vt} \geq \frac{1}{3} \frac{350 \cdot 75}{400}$$

$$157,0796 \text{ mm}^2 \geq 21,875 \text{ mm}^2 \quad \text{memenuhi syarat}$$

Maka digunakan sengkang tertutup $\emptyset 10$ -90

Kebutuhan tulangan torsi arah longitudinal

$$A_t = \frac{A_t}{s} p_h \left(\frac{f_{yv}}{f_{yl}} \right) \cot^2 \theta$$

$$A_t = 0,6735 \cdot 1640 \cdot \left(\frac{400}{400}\right) 1,0^2 = 1104,54 \text{ mm}^2$$

$$A_{t,\min} = \frac{5\sqrt{f'_c} A_{cp}}{12f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s}\right) \rho_h \frac{f_{yv}}{f_{yt}}$$

$$\frac{A_t}{s} \geq b_w / 6f_{yv} = 350 / 6.400 = 0,1458$$

$$A_{t,\min} = \frac{5\sqrt{28} \cdot 227500}{12.400} - (0,6735) \cdot 1640 \cdot \frac{400}{400}$$

$$A_{t,\min} = 1253,8759 - 1104,54 = 149,4359 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 1104,54 > A_{t,\min} = 149,4359 \quad \text{Memenuhi syarat}$$

Maka digunakan tulangan torsi arah longitudinal 1104,54 mm²

Dalam pemasangannya tulangan torsi longitudinal (A_t) disebar; $\frac{1}{4} A_t$ dipasang di

sisi atas, $\frac{1}{4} A_t$ di sisi bawah dan $\frac{1}{2} A_t$ didistribusikan merata pada muka tampang

arah vertikal untuk memenuhi ketentuan jarak maksimum tulangan longitudinal sebesar 300 mm, sehingga:

- Tulangan bagian atas: $\frac{1}{4} 1104,54 \text{ mm}^2 = 276,135 \text{ mm}^2$

Dipakai 2D16 = 402,1239 mm²

- Tulangan bagian badan: $\frac{1}{2} 1104,54 \text{ mm}^2 = 552,27 \text{ mm}^2$

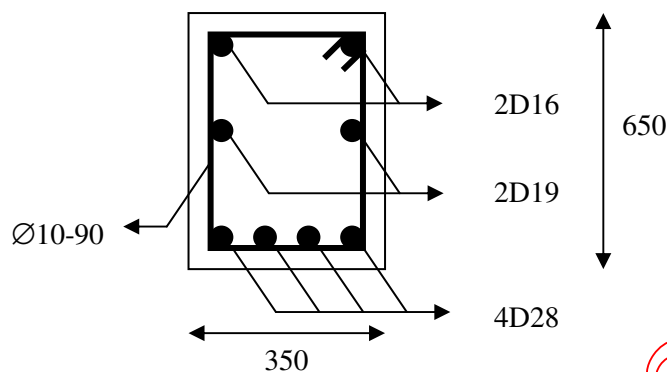
Dipakai 2D19 = 567,0575 mm²

- Tulangan bagian bawah: $A_s + \frac{1}{4} A_t$

$$4D25 + \frac{1}{4} 1104,54 \text{ mm}^2 = 2239,63 \text{ mm}^2$$

$$1963,495 + \frac{1}{4} 1104,54 \text{ mm}^2 = 2239,63 \text{ mm}^2$$

Dipakai 4D28 = 2463,0086 mm²



Kasus (b)

Diasumsikan bagian sayap (flens) tidak menyatu secara monolith dengan bagian badan (web), maka:

$$A_{cp} = 350 \times 650 = 227500 \text{ mm}^2$$

$$P_{cp} = 2(350 + 650) = 2000 \text{ mm}$$

Hitung batasan nilai momen torsi yang boleh diabaikan:

$$\begin{aligned} T_u &= \phi \cdot \frac{\sqrt{f'c}}{12} \cdot \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \\ &= 0,75 \cdot \frac{\sqrt{28}}{12} \cdot \left(\frac{287500^2}{3600} \right) = 7593329,228 \text{ N.mm} = 7,5933 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$T_u = 40 \text{ kN.m} > 7,5933 \text{ kN.m}$ maka torsi harus diperhitungkan.

Hitung batas atas nilai momen torsi yang harus diperhitungkan pada torsi keselarasan yang disertai redistribusi momen:

$$\begin{aligned} T_u &= \phi \cdot \frac{\sqrt{f'c}}{3} \cdot \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \\ &= 0,75 \cdot \frac{\sqrt{28}}{3} \cdot \left(\frac{287500^2}{3600} \right) = 30373316,92 \text{ N.mm} = 30,3733 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$T_u = 40 \text{ kN.m} > 30,3733 \text{ kN.m}$

Maka momen torsi yang diperhitungkan adalah $T_u = 30,3733 \text{ kN.m}$

Hitung tahanan momen torsi yang diperlukan (T_n)

$$T_n = \frac{T_u}{\phi} = \frac{30,3733 \text{ kN.m}}{0,75} = 40,4978 \text{ kN.m} = 40,4978 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

Hitung sifat-sifat tampang datar yang diperlukan

$A_o = 0,85.A_{oh}$, di mana A_{oh} merupakan bagian luasan penampang yang dibatasi garis berat sengkang tertutup. Jika diasumsikan diameter sengkang 10 mm dan selimut beton yang digunakan setebal 40 mm, maka:

$$x_1 = 350 - 2.(40 + 5) = 260 \text{ mm}$$

$$y_1 = 650 - 2.(40 + 5) = 560 \text{ mm}$$

$$A_{oh} = x_1 \cdot y_1 = 260 \cdot 560 = 145600 \text{ mm}^2$$

$$A_o = 0,85.A_{oh} = 0,85 \cdot 145600 = 123760 \text{ mm}^2$$

$$d = 650 - 40 - 10 - \frac{25}{2} = 587,5 \text{ mm}$$

$$p_h = 2.(x_1 + y_1) = 2.(260 + 560) = 1640 \text{ mm}$$

Nilai θ ditetapkan 45° karena merupakan komponen struktur non-pratekan, sehingga nilai $\cot \theta = 1,0$

Periksa kecukupan dimensi penampang menurut Persamaan (5-42)

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u p_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + \frac{2\sqrt{f'_c}}{3}\right)$$

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6}\right) b_w \cdot d = \left(\frac{\sqrt{28}}{6}\right) \cdot 350 \cdot 587,5 = 181344,2044 \text{ N}$$

$$\sqrt{\left(\frac{200000}{350 \cdot 587,5}\right)^2 + \left(\frac{30373316,92 \cdot 1640}{1,7 \cdot 145600^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{181344,2044}{350 \cdot 587,5} + \frac{2\sqrt{28}}{3}\right)$$

$1,6901 \text{ MPa} < 3,3073 \text{ MPa}$ Maka kuat lentur tampang mencukupi

Hitung kebutuhan tulangan torsi

$$\begin{aligned} \frac{A_t}{s} &= \frac{T_n}{2 \cdot A_o \cdot f_y \cdot \cot \theta} = \frac{40,4978 \times 10^6}{2 \cdot 123760 \cdot 400 \cdot 1,0} \\ &= 0,409 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{satu kaki} \end{aligned}$$

Hitung kebutuhan tulangan geser

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'c}}{6} \right) \cdot b_w \cdot d = \left(\frac{\sqrt{28}}{6} \right) \cdot 350 \cdot 587,5 = 181344,2044 N$$

$$\phi \cdot V_c = 0,75 \cdot 181344,2044 = 136008,1533 N$$

$$V_{n,perlu} = \frac{V_u}{\phi} = \frac{200000}{0,75} = 266666,6667 N$$

dengan demikian $\phi \cdot V_c < V_u < 3 \cdot \phi \cdot V_c$, sehingga perlu tulangan geser

$$V_{s,perlu} = \frac{V_u}{\phi} - V_c = 266666,6667 - 181344,1533 = 85322,5134 N$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{f_y \cdot d} = \frac{85322,5134}{400 \cdot 587,5} = 0,3631 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{dua kaki}$$

$$\frac{A_{vt}}{s} = \frac{2 \cdot A_t}{s} + \frac{A_v}{s} = 2,0409 + 0,3631 = 1,1812 \text{ mm}^2 / \text{mm} / \text{dua kaki}$$

dengan sengkang berdiameter 10 mm, maka luasan dua kaki

$$A_{\phi 10} = 0,25 \cdot \pi \cdot 10^2 \cdot 2 = 157,0796 \text{ mm}^2 / \text{dua kaki}$$

$$s = \frac{A_{\phi 10}}{\frac{A_{vt}}{s}} = \frac{157,0796}{1,1812} = 132,9863 \text{ mm} \approx 125 \text{ mm}$$

syarat pemasangan tulangan torsi:

$$s < s_{\max} = \frac{p_h}{8} \leq 300 \text{ mm}$$

$$125 < s_{\max} = \frac{1640}{8} = 205 \text{ mm} \leq 300 \text{ mm} \quad \text{memenuhi syarat}$$

$$A_{vt} \geq \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_{yv}}$$

$$A_{vt} \geq \frac{1}{3} \frac{350 \cdot 75}{400}$$

$$157,0796 \text{ mm}^2 \geq 21,875 \text{ mm}^2 \quad \text{memenuhi syarat}$$

Maka digunakan sengkang tertutup $\emptyset 10$ -125

Kebutuhan tulangan torsi arah longitudinal

$$A_t = \frac{A_t}{s} p_h \left(\frac{f_{yv}}{f_{yl}} \right) \cot^2 \theta$$

$$A_t = 0,409 \cdot 1640 \cdot \left(\frac{400}{400}\right) 1,0^2 = 670,76 \text{ mm}^2$$

$$A_{t,\min} = \frac{5\sqrt{f'_c} A_{cp}}{12f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s}\right) \rho_h \frac{f_{yv}}{f_{yt}}$$

$$\frac{A_t}{s} \geq b_w / 6f_{yv} = 350 / 6.400 = 0,1458$$

$$A_{t,\min} = \frac{5\sqrt{28} \cdot 227500}{12.400} - (0,409) \cdot 1640 \cdot \frac{400}{400}$$

$$A_{t,\min} = 1253,8759 - 670,76 = 583,2159 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 670,76 > A_{t,\min} = 583,2159 \quad \text{Memenuhi syarat}$$

Maka digunakan tulangan torsi arah longitudinal $670,76 \text{ mm}^2$

Dalam pemasangannya tulangan torsi longitudinal (A_t) disebar; $\frac{1}{4} A_t$ di sisi atas

penampang, $\frac{1}{4} A_t$ di sisi bawah dan $\frac{1}{2} A_t$ didistribusikan secara merata pada muka tampang arah vertikal untuk memenuhi ketentuan jarak maksimum tulangan longitudinal sebesar 300 mm, sehingga:

- Tulangan bagian atas: $\frac{1}{4} 670,76 \text{ mm}^2 = 167,79 \text{ mm}^2$

Dipakai $2D12 = 226,1947 \text{ mm}^2$

- Tulangan bagian badan: $\frac{1}{2} 670,76 \text{ mm}^2 = 335,38 \text{ mm}^2$

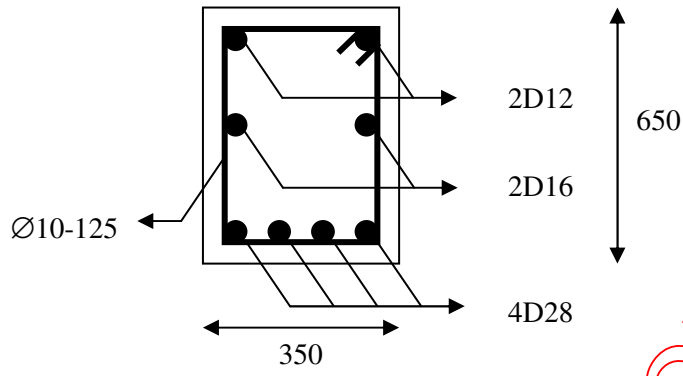
Dipakai $2D16 = 402,1239 \text{ mm}^2$

- Tulangan bagian bawah: $A_s + \frac{1}{4} A_t$

$$4D25 + \frac{1}{4} 670,76 \text{ mm}^2 = 2131,1854 \text{ mm}^2$$

$$1963,495 + \frac{1}{4} 670,76 \text{ mm}^2 = 2131,1854 \text{ mm}^2$$

Dipakai $4D28 = 2463,0086 \text{ mm}^2$



E-mail: Swidodo@uny.ac.id