

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Balok Tinggi Beton Bertulang

Menurut ACI 318-11, balok tinggi didefinisikan sebagai komponen struktur dengan beban bekerja pada salah satu mukanya dan ditumpu pada muka yang berlawanan sehingga *strut* tekan dapat terbentuk diantara beban dan tumpuan. Balok tinggi juga harus mempunyai salah satu syarat yaitu bentang bersih l_n sama dengan atau kurang dari empat kali tinggi balok h atau daerah dengan beban terpusat dalam jarak $2h$ dari muka tumpuan. Hal ini didukung oleh (Schlaich dkk, 1987; Wight dan MacGregor, 2012) yang menyebutkan bahwa balok tinggi adalah komponen struktur dengan jarak lengan geser/ tinggi efektif balok a/d kira-kira kurang dari 2,0 sampai 2,5. Sedangkan Eurocode 2 (EC2) mendefinisikan balok tinggi adalah semua balok dengan a/d lebih kecil daripada 3. Balok tinggi pada umumnya digunakan sebagai elemen struktur penyalur beban seperti *transfer girder*, *pile cap*, *foundation wall* dan struktur lepas pantai (Russo dkk, 1991; Russo dan Puleri, 1997).

3.2. Penampang dan Kuat Geser Balok-T Beton Bertulang

Pada sistem struktur portal, balok anak dan induk umumnya menjadi satu kesatuan monolit dengan pelat. Akibatnya kedua bagian bekerja sama untuk menahan beban (McCormac dan Brown, 2014). Selain dari sistem portal, analisis balok-T juga dilakukan pada sistem balok *pracetak* penampang-T yang menerima

beban pelat. Elemen pelat dapat terletak bebas di atas balok, seperti pelat lantai kendaraan pada jembatan. Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan keruntuhan karena lentur. Balok dengan keruntuhan geser umumnya tanpa adanya peringatan awal. Penampang harus dirancang cukup kuat untuk memikul beban geser luar rencana karena perilaku kegagalan getas (*brittle*) ini. Gaya geser secara bersama ditahan oleh sengkang/tulangan geser dan beton (Nasution, 2009).

3.3. Kuat Tekan Beton

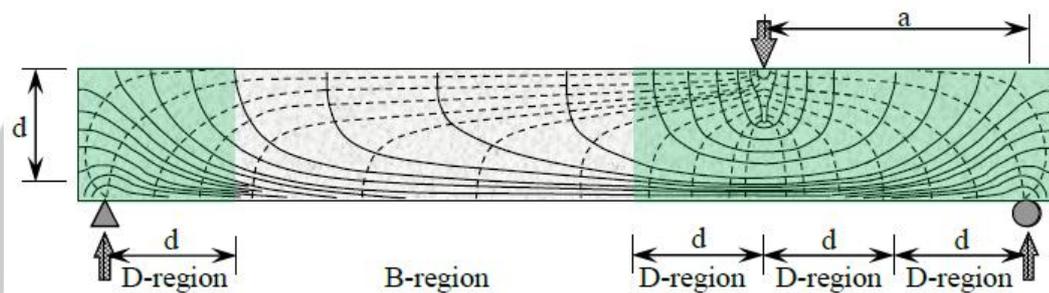
ACI 318-11 mengklasifikasikan beton menurut kuat tekannya, yaitu :

- a. Beton dengan mutu rendah yaitu $f_c' < 21$ MPa
- b. Beton dengan mutu normal/sedang yaitu $21 \leq f_c' \leq 35$ MPa
- c. Beton dengan mutu tinggi yaitu $f_c' > 35$ MPa

3.4. *Discontinuity Regions* (Daerah Terganggu) Balok

Pada umumnya balok beton bertulang dirancang berdasarkan hipotesis Bernoulli atau teori penampang balok. Teori itu menyebutkan regangan pada balok dianggap bervariasi secara linear pada satu bagian dan balok didominasi oleh perilaku penampang. Gambar 3.1 menunjukkan daerah tegangan linear (atau regangan) yang disebut sebagai B-region ("B" untuk Bernoulli) dan D-region ("D" untuk diskontinuitas atau terganggu) biasanya berada di kedua sisi daerah B. Daerah D tidak dapat dirancang menggunakan prosedur teori penampang balok karena asumsi yang digunakan untuk memperoleh teori tersebut tidak berlaku lagi. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.1, regangan terdistribusi nonlinear ke seluruh daerah D. Pada lengan geser balok bagian kiri yang terdiri dari B dan D-

region merupakan balok biasa dengan a/d lebih besar daripada 2,5 dan dalam pendesainannya dapat menggunakan teori penampang balok. Sedangkan pada lengan geser balok bagian kanan yang hanya terdiri dari *D-regions* merupakan balok tinggi dengan a/d lebih kecil daripada 2 sampai 2,5, yang salah satu prosedur desainnya menggunakan *STM* (Larson, 2013).



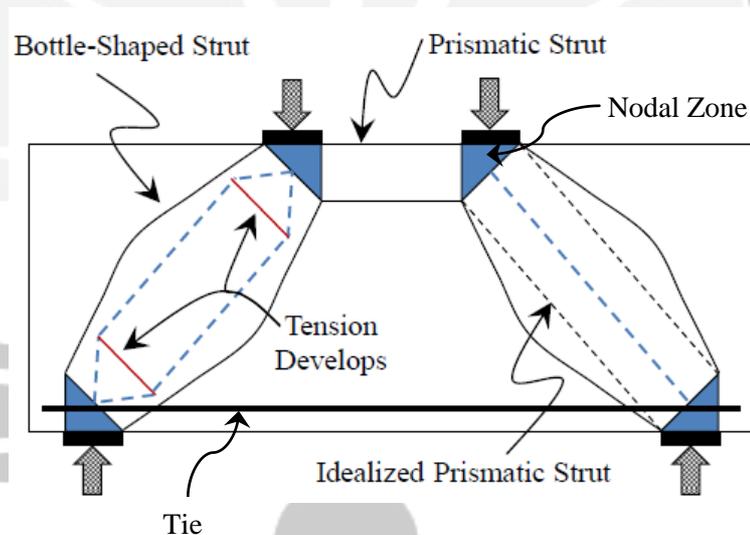
Gambar 3.1. Trayektori Tegangan Utama dengan B dan D-Region
(Sumber: Birrcher dkk, 2009)

3.5. Metode *Strut and Tie Model (STM)*

Menurut Hardjasaputra dan Tumilar (2002) *Strut and Tie Model* berawal dari *truss analogy model* yang pertama kali diperkenalkan oleh Ritter pada tahun 1899 dan Morsch pada tahun 1902. Dengan memperhatikan pola retak, digunakan model rangka batang (*truss*) untuk menjelaskan aliran gaya (*load path*) transfer beban F ke tumpuan yang terjadi pada struktur beton bertulang dalam keadaan retak (*cracked condition*).

Martin dan Sanders (2007) menyebutkan bahwa *STM* adalah suatu pendekatan untuk memperkirakan wilayah diskontinuitas (*D-regions*) pada struktur beton bertulang dan prategang. *STM* menyederhanakan tegangan yang kompleks dalam suatu *D-region* ke dalam konfigurasi *truss* sederhana sebagai jalur tegangan uniaksial. Setiap jalur tegangan uniaksial dianggap sebagai elemen

STM. Pada Gambar 3.2, ditunjukkan suatu penerapan *STM* pada balok tinggi dengan dua pembebanan titik dan tumpuan sederhana yang berdasarkan trayektori tegangan. Elemen *STM* yang mengalami tegangan tarik dinamakan *tie* dan menunjukkan lokasi dimana tulangan tarik harus ditempatkan. Elemen *STM* yang mengalami desak disebut *strut*. Pada kenyataannya *strut* yang terbentuk antara tumpuan dengan titik pembebanan berupa botol, namun dalam analisisnya diidealisaikan sebagai *strut* prismatik. Begitu pula *strut* yang terbentuk antara beban titik merupakan *strut* prismatik dan tegangan yang terjadi (*tension develops*) pada *strut* merupakan lebar *strut*. Sedangkan titik persimpangan *strut*, *tie* dan tumpuan atau pembebanan dinamakan *node* (*nodal zone*).

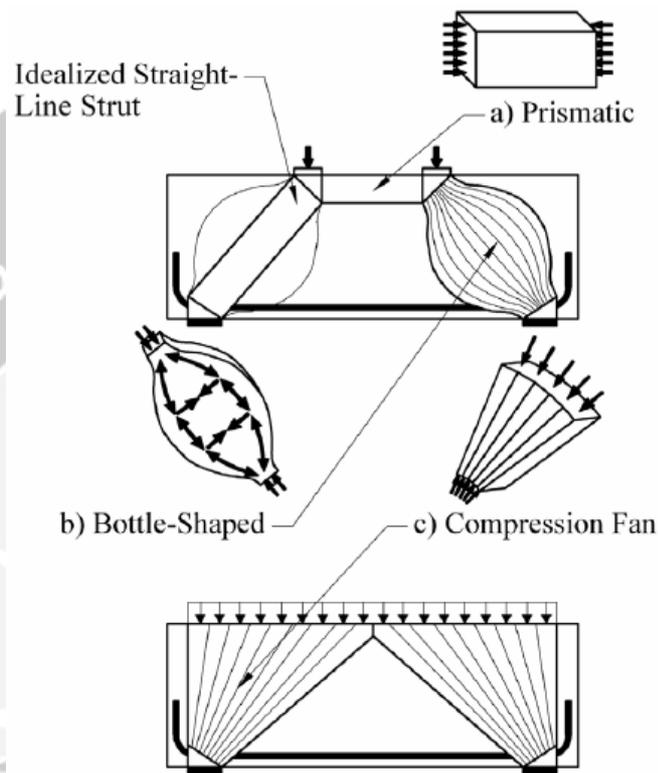


Gambar 3.2. Pemodelan *Strut* and *Tie* Model
(Sumber: Birrcher dkk, 2009)

3.6. Elemen *Strut*

Elemen *strut* dalam *STM* merupakan idealisasi dari trayektori tegangan tekan beton dimana arah dari *strut* searah dengan tegangan tekan beton. Pada Gambar 3.3 ditunjukkan macam-macam bentuk *strut*. Balok tinggi yang diberikan beban titik akan menghasilkan *strut* berbentuk prismatik dan botol, yang

kemudian diidealisasikan sebagai *strut* prismatic. Sedangkan balok yang dibebani merata akan menghasilkan *strut* berbentuk kipas.



Gambar 3.3. Idealisasi Bentuk-bentuk *Strut*
(Sumber: Martin dan Sanders, 2007)

Kekuatan dari *strut* ditentukan oleh kuat hancur beton pada *strut*. Kuat hancur beton ini lebih rendah daripada kuat hancur beton hasil pengujian silinder (ACI 318-11).

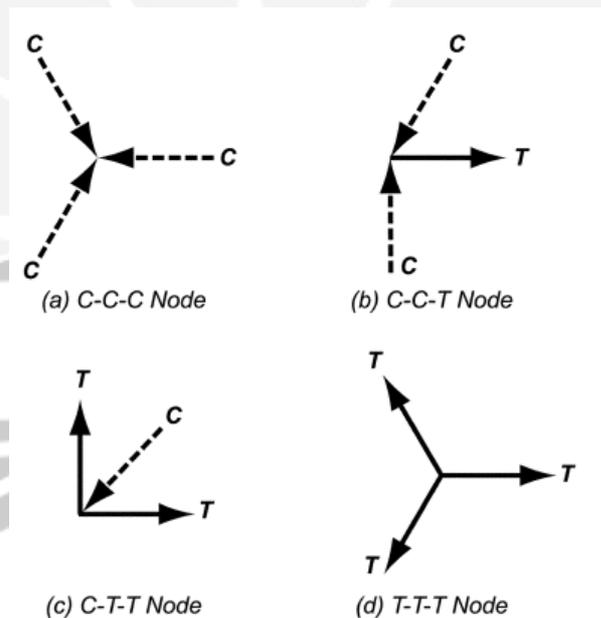
3.7. Elemen *Tie*

Komponen terpenting kedua dari model *strut and tie* adalah komponen tarik (*tie*). Gaya tarik dari *ties* dapat mengakibatkan keruntuhan pada daerah penjangkaran (*nodal zone*). Pengangkeran *ties* di daerah *nodal* merupakan hal sangat penting untuk meyakinkan *ties* mencapai kekuatan lelehnya (ACI 318-11).

3.8. Elemen Nodal Zone

Nodal zone merupakan suatu wilayah dimana terdapat titik pertemuan antara gaya-gaya pada *strut* dan *tie* dari suatu model *strut and tie* bertemu. Secara konsep dalam rangka batang, titik-titik ini diidealisasikan sebagai sendi. Pada Gambar 3.4 ditunjukkan ada empat tipe *nodal zone* yaitu :

- C-C-C : bila tiga buah gaya tekan bertemu pada titik nodal
- C-C-T : bila satu dari ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tarik
- C-T-T : bila salah satu dari ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tekan
- T-T-T : bila ketiga gaya yang bertemu adalah gaya tarik (ACI 318-11).



Gambar 3.4. Tipe-tipe Nodal dalam Metode *STM*
(Sumber: ACI 318, 2011)

3.9. Persamaan yang diusulkan A. Arabzadeh, A.R. Rahaie dan R. Aghayari (2009) untuk Memprediksi Kuat Geser Ultimit Balok Tinggi Beton Bertulang

Prediksi kuat geser ultimit balok tinggi-T beton bertulang melibatkan kombinasi dua mekanisme balok, yaitu kehancuran diagonal pada *strut* beton karena *STM* dan gaya tahanan tegak lurus tulangan badan ke *strut*. Apabila dituliskan dalam persamaan sebagai berikut ini:

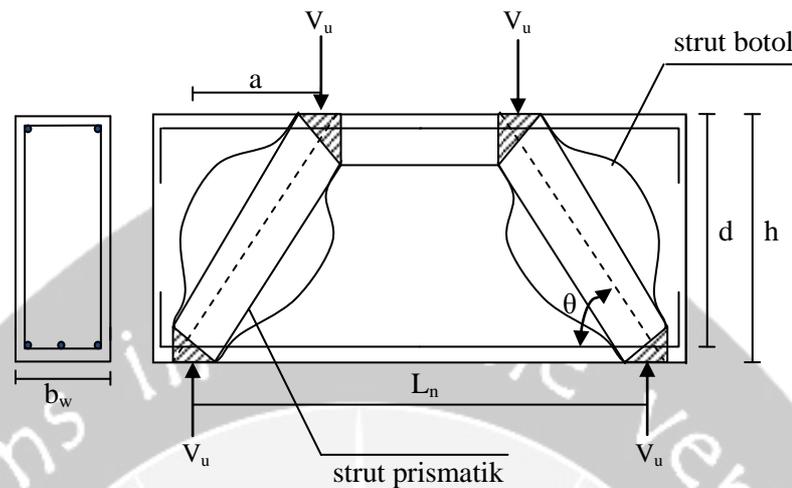
$$V_u = V_c + V_w \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana V_u adalah kuat geser ultimit, V_c adalah kuat geser karena *strut* beton dan V_w adalah kuat geser karena tulangan badan. Berikut ini adalah penjelasan untuk mendapatkan persamaan kuat geser ultimit yang diusulkan :

3.9.1 Kuat Geser Balok Karena *Strut* Beton (V_c).

a. Dasar *Strut and Tie Model (STM)*

Gambar 3.5 menunjukkan balok tinggi beton bertulang yang dinyatakan dalam *STM*. Balok ini dibebani pada muka bagian atas dengan dua beban titik vertikal dan didukung dengan tumpuan sederhana (sendi dan rol). Tulangan longitudinal tarik ditempatkan pada jarak d dari muka atas balok. Balok ini tidak diperkuat dengan tulangan badan. Kuat lentur balok diasumsikan tercukupi maka kegagalan balok diatur oleh tegangan desak pada *strut* dan hal tersebut merupakan keruntuhan diagonal. Kuat geser diprediksi dengan *STM* berdasarkan *strut* diagonal dan gaya geser mengalir sepanjang *strut* dari titik beban ke tumpuan.



Gambar 3.5. Geometri Balok Tinggi-T Beton Bertulang

Pada Gambar 3.6 ditunjukkan keseimbangan gaya yang terjadi pada setengah bentang balok, dan gaya-gaya tersebut dapat dirumuskan seperti berikut :

$$V_c = C_c \sin \theta \dots\dots\dots(3.2)$$

$$T_s = C_c \cos \theta \dots\dots\dots(3.3)$$

Dengan : C_c adalah gaya tekan di *strut* diagonal, θ adalah sudut antara *strut* diagonal dan tulangan longitudinal, V_c adalah beban teraplikasi pada bagian atas balok tinggi dan T_s adalah gaya tarik pada tulangan longitudinal (*ties*).

Sudut yang terbentuk dari *strut* diagonal adalah sebagai berikut:

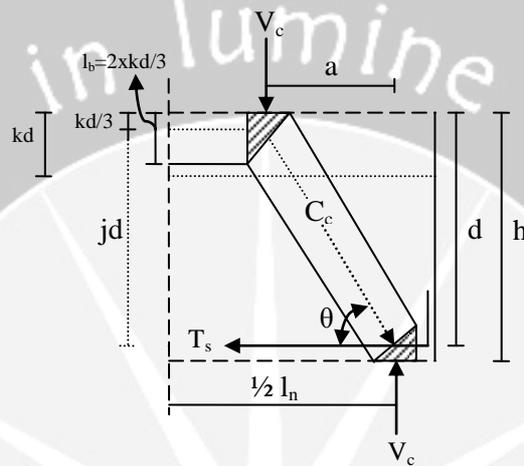
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{jd}{a} \right) \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan : a adalah bentang geser balok, jd adalah jarak lengan gaya dari pusat gaya desak ke tengah penampang tulangan longitudinal tarik.

Berdasarkan asumsi dari Hwang dkk (2000), kondisi ini bisa diestimasi sebagai berikut:

$$jd = d - \frac{kd}{3} = \left(1 - \frac{k}{3}\right) d \dots\dots\dots(3.5)$$

Dengan : kd adalah tinggi zona desak, k sebagai koefisien pengali yang didapat dari *elastic bending theory* untuk balok satu bentang, didefinisikan sebagai berikut (Hwang dkk, 2000) :



Gambar 3.6. Keseimbangan *Strut* dengan Ketiadaan Tulangan Badan

$$k = \sqrt{(n \cdot \rho)^2 + 2n \cdot \rho} - n \cdot \rho \dots\dots\dots(3.6)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \times d} \dots\dots\dots(3.8)$$

Dengan : n adalah rasio modulus elastisitas, E_s adalah modulus elastisitas tulangan dan E_c adalah modulus elastisitas beton, ρ adalah rasio tulangan longitudinal tarik, A_s adalah luas area tulangan tarik, b_w adalah lebar balok.

Alasan Hwang dkk (2000) untuk menggunakan *elastic bending theory* adalah untuk mensimulasikan situasi dimana balok tinggi gagal di geser tetapi tetap mencadangkan kapasitas lenturnya. Situasi ini sangat umum dijumpai dalam pengujian penampang balok tinggi.

Gaya yang bekerja di *strut* bisa dihitung sebagai berikut :

$$C_c = f_{ce}' \times A_{str} \dots\dots\dots(3.9)$$

Dengan : f_{ce}' adalah kuat desak maksimum *softened concrete strut* dan A_{str} adalah luasan penampang menyilang *strut* yang mana bisa dihitung sebagai berikut ini :

$$A_{str} = b_w \times a_s \dots\dots\dots(3.10)$$

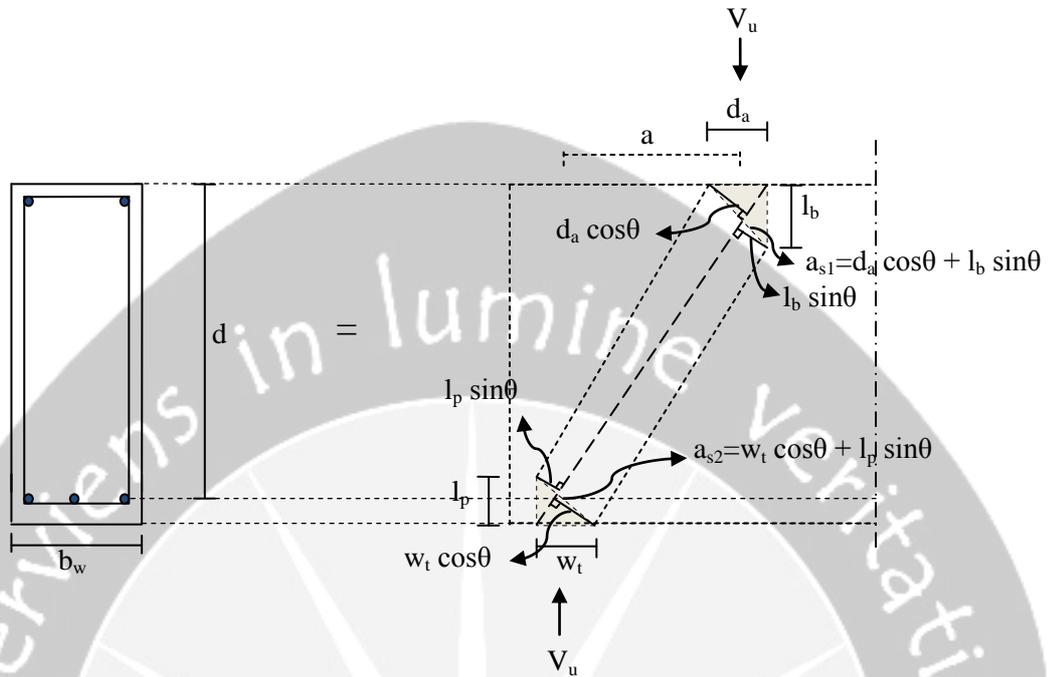
Dengan : b_w adalah lebar badan balok dan a_s adalah lebar *strut*.

Gambar 3.7 memberikan gambaran untuk mendapatkan lebar *strut* (a_s). Lebar *strut* bagian nodal zone daerah pembebanan (a_{s1}) dan daerah tumpuan (a_{s2}) dimungkinkan berbeda. Selanjutnya lebar *strut* yang terpakai (a_s) merupakan lebar paling kecil antara a_{s1} dan a_{s2} , yang perhitungannya dapat ditunjukkan sebagai berikut ini :

$$a_s = \min(a_{s1}, a_{s2}) \dots\dots\dots(3.11)$$

$$a_s = \min(d_a \times \cos\theta + l_b \times \sin\theta, w_t \times \cos\theta + l_p \times \sin\theta) \dots\dots\dots(3.12)$$

Dengan : l_p adalah tinggi nodal bawah, dapat diambil dua kali selimut beton ke tengah penampang tulangan longitudinal tarik, w_t adalah lebar plat tumpuan, l_b adalah tinggi nodal atas, diambil dari $2 \times kd/3$, d_a adalah lebar plat di titik pembebanan.



Gambar 3.7. Geometri *Strut* Prismatik

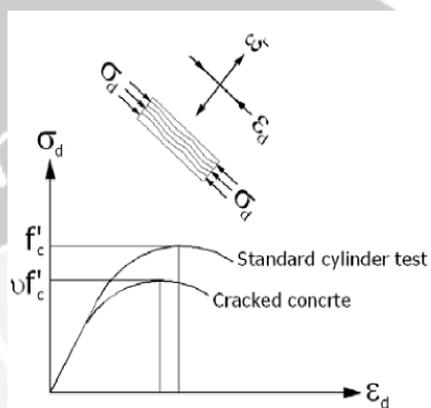
b. Kuat desak *softened* beton

Kuat desak beton di balok akan lebih rendah dibandingkan hasil pengujian silinder dikarenakan regangan tarik yang tegak lurus ke *strut* akan mengurangi kapasitas *strut* beton untuk menahan tegangan desak. Fenomena ini disebut kuat desak *softened* beton atau perlemahan kuat desak pada beton. Pada penerapan STM, f_{ce}' atau kuat desak maksimum *softened* beton pada *strut* bisa dihitung sebagai berikut:

$$f_{ce}' = v \times f_c' \dots\dots\dots(3.13)$$

Dengan : v adalah faktor efisiensi beton, f_c' adalah kuat desak beton berdasarkan pengujian silinder beton.

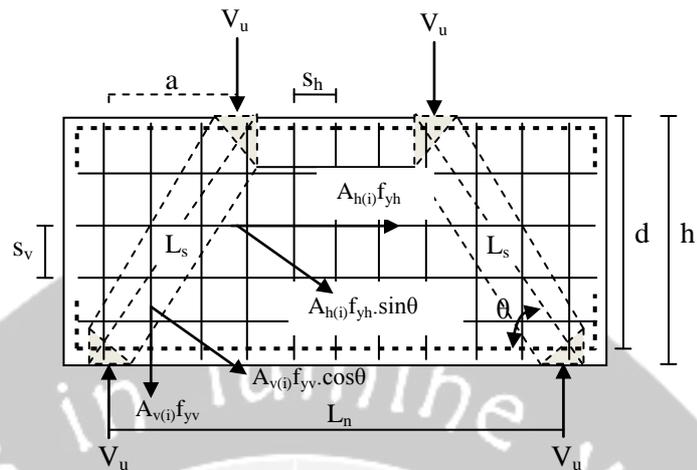
Gambar 3.8 menunjukkan bahwa kuat desak *softened concrete* (f_{ce} atau $\nu f_c'$) menghasilkan tegangan dan regangan lebih rendah dibandingkan dengan kuat desak beton berdasarkan pengujian silinder beton (f_c').



Gambar 3.8. Kurva Softening Tegangan-Regangan Tekan karena Regangan Tarik Transversal.
(Sumber : Hwang dkk, 2000)

3.9.2. Kuat Geser Balok Karena Tulangan Badan (V_w).

Gambar 3.9 menunjukkan masing-masing konfigurasi tulangan badan balok yang terdiri dari tulangan vertikal (A_v) dengan jarak antar tulangan (s_h) dan tulangan horizontal (A_h) dengan jarak antar tulangan (s_v). Hasil pengujian membuktikan bahwa tulangan badan baru efektif bekerja setelah retak terjadi pada badan. Jika retak sobek diasumsikan terbuka tanpa penahan geser sepanjang retak, gaya pada tulangan menyilang retak harus dihitung dalam keadaan *uniaxial*. Jika tidak, itu bisa diasumsikan bahwa *slip* geser pada keadaan tegang akan menjadi *biaxial* karena tegangan tarik dan tegangan geser diaplikasikan di tulangan (Brown dan Bayrak, 2006).



Gambar 3.9. Gaya-Gaya yang Terjadi pada Penulangan Badan Balok

Pada penelitian Arabzadeh dkk, *slip* geser sepanjang retak sobekan tidak dipertimbangkan. Dalam *STM* itu diasumsikan bahwa retak diagonal terjadi pada keadaan penuh dan di sana tidak ada gaya karena ikatan antar agregat (Brown dan Bayrak, 2006). Gaya ketahanan ekuivalen maksimum tegak lurus ke retak sobek $F_{p(max)}$ bisa ditulis sebagai berikut (Chun dkk, 2007) :

$$F_{p(max)} = A_v \cdot f_{yv} \cdot \cos\theta + A_h \cdot f_{yh} \cdot \sin\theta \dots\dots\dots(3.14)$$

$$F_{p(max)} = \frac{A_v \cdot f_{yv}}{n_v \cdot s_v} L_s \cdot \cos^2\theta + \frac{A_h \cdot f_{yh}}{n_h \cdot s_h} L_s \cdot \sin^2 \dots\dots\dots(3.15)$$

Dengan : n_v , n_h adalah jumlah tulangan yang memotong retak secara vertikal dan horizontal, f_{yv} adalah mutu tarik baja tulangan badan arah vertikal, f_{yh} adalah mutu tarik baja tulangan badan arah horizontal, s_v , s_h adalah jarak antar tulangan badan secara vertikal dan horizontal, $A_{h(i)}$ dan $A_{v(i)}$ adalah luas penampang setiap tulangan badan baik secara vertikal dan horizontal yang memotong retak, sehingga A_h dan A_v adalah total luas

penampang tulangan badan baik secara vertikal dan horizontal yang memotong retak, dan L_s adalah panjang *strut* (Chun dkk, 2007).

Dengan mensubstitusikan $\rho_v = \frac{A_v}{b \cdot n_v \cdot s_v}$, $\rho_h = \frac{A_h}{b \cdot n_h \cdot s_h}$ dan $f_{yv} = f_{yh} = f_y$

dalam persamaan 3.15, maka :

$$F_{p(\max)} = \rho_v \cdot f_y \cdot b_w \cdot L_s \cdot \cos^2 \theta + \rho_h \cdot f_y \cdot b_w \cdot L_s \cdot \sin^2 \theta \dots\dots\dots(3.16)$$

Maksimum kontribusi tarik pada arah tegak lurus retak $f_{p(\max)}$ bisa dihitung sebagai berikut ini (Chun dkk, 2007) :

$$f_{p(\max)} = \rho_v \cdot f_y \cdot \cos^2 \theta + \rho_h \cdot f_y \cdot \sin^2 \theta \dots\dots\dots(3.17)$$

$$f_{p(\max)} = (\rho_v \cdot \cos^2 \theta + \rho_h \cdot \sin^2 \theta) f_y \dots\dots\dots(3.18)$$

$$f_{p(\max)} = \rho_p f_y \dots\dots\dots(3.19)$$

Istilah baru ρ_p didefinisikan sebagai rasio tulangan ekuivalen ke retak sobek, dan bisa dihitung sebagai berikut ini :

$$\rho_p = \rho_v \cdot \cos^2 \theta + \rho_h \cdot \sin^2 \theta \dots\dots\dots(3.20)$$

Dengan : ρ_p adalah rasio ekuivalen yang dihitung dalam tangensial-luas penampang *strut*. ($A_{str(t)} = b \cdot L_s$), dimana $A_{str(t)}$ adalah luas tangensial-penampang *strut*.

Dalam ACI 318-05 berdasarkan persamaan (A-4) di dalam Appendix A, nilai dari ρ_p didefinisikan sebagai berikut ini :

$$\rho_p = (\rho_v \cdot \cos \theta + \rho_h \cdot \sin \theta) \dots\dots\dots(3.21)$$

3.9.3. Keseimbangan Gaya Bekerja pada *Strut*

Gaya internal muncul di *STM* karena beban diaplikasikan, dinamakan C_c dan F_p total kuat geser dari balok dibentuk oleh keseimbangan vertikal C_c dan F_p

$$V_u = C_c \cdot \sin\theta + F_p \cdot \cos\theta = V_c + V_w \dots\dots\dots(3.22)$$

$$V_u = C_c \cdot \sin\theta + \beta \cdot \rho_p \cdot b_w \cdot L_s \cdot \cos\theta \dots\dots\dots(3.23)$$

Dengan : $C_c \sin \theta$ atau V_c adalah kuat geser dengan syarat *STM* karena *strut* tekan beton diagonal dan $F_p \cos \theta$ atau V_w adalah kuat geser dihasilkan oleh mekanisme ketahanan tulangan badan berlawanan dengan sobek beton.

Dalam persamaan (3.16) diasumsikan bahwa tulangan badan memperoleh tegangan lelehnya, tetapi dalam prakteknya tulangan badan diperlakukan untuk bermacam-macam tegangan. Tulangan ditempatkan di area tengah dari *strut* mempunyai regangan paling tinggi di perbandingan dengan tulangan dekat tumpuan-tumpuan atau titik pembebananan. Oleh karena itu f_y disubsitusikan oleh rata-rata tegangan di tulangan badan sama untuk βf_y . Berdasarkan hasil eksperimental β adalah suatu koefisien yang tergantung pada rasio tulangan tegak lurus ekuivalen (ρ_p) dan harus lebih kecil daripada 1,0.

Mensubstitusikan persamaan (3.22) ke persamaan (3.2) memberikan hasil sebagai berikut:

$$V_u = v_{cw} \cdot f_c' \cdot A_{str} \cdot \sin\theta \dots\dots\dots(3.24)$$

Dengan :

$$v_{cw} = v_c + v_w = v_c + \beta \cdot \rho_p \cdot \frac{a}{a_s} \cdot \left(\frac{f_y}{f_c'}\right) \cdot \frac{1}{\sin\theta} \dots\dots\dots(3.25)$$

Perbedaan antara v_{cw} dan v_c hanya sebatas v_w yaitu ada atau tidaknya tulangan badan. Oleh karena itu itu bisa diasumsikan bahwa kuat geser balok tinggi hanya dipengaruhi oleh *strut* desak diagonal, namun demikian untuk menentukan gaya *strut* dalam persamaan (3.2), faktor efisiensi harus diperhitungkan dengan mempertimbangkan efek tulangan badan dalam persamaan (3.25).

Model nonlinear untuk menghitung v_{cw} (3.25) bisa diperoleh dari persamaan (3.26).

$$v_{cw} = \frac{f_c^x}{A+B\left(\frac{a}{d}\right)^2} + \beta \cdot \rho_p \cdot \left(\frac{f_y}{f_c'}\right) \cdot \frac{a}{a_s} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \dots\dots\dots(3.26)$$

Bagian pertama dari persamaan (3.26) menunjukkan faktor efisiensi tanpa adanya tulangan badan, yang didapat dengan perkalian *compression softening model*. Persamaan untuk menghitung v_c diadopsi dari penyederhanaan model yang diusulkan oleh Vecchio dan Collins (1986) berdasarkan *MCFT (Modified Compression Field Theory)*.

Ada tiga parameter tidak diketahui (A, B, x) dan sebuah fungsi tidak diketahui (β) di dalam persamaan (3.26) yang harus ditetapkan berdasarkan hasil eksperimen. Untuk tujuan ini, 324 balok tinggi telah dipilih dari referensi yang diambil. Berikut detail balok tinggi dalam pengumpulan *data base* :

- a. Mempunyai sudut kemiringan *strut* θ lebih besar daripada 25° dan rasio bentang bersih per tinggi keseluruhan kurang dari 4 (berdasarkan Appendix A-ACI 318-05)
- b. Semua balok merupakan tumpuan sederhana dengan satu atau dua titik pembebanan, dengan pelat penahan di tumpuan dan titik pembebanan diadopsi dari referensi yang bersangkutan. Pengaturan mode kegagalan balok adalah geser (geser, geser-tekan atau geser lentur) dan setiap *specimens* yang dipilih belum gagal pada mode lentur atau karena kegagalan pada titik pembebanan atau tumpuan.

Faktor tidak diketahui dalam persamaan (3.26) ditentukan dengan regresi nonlinear dan meminimalisasi *error residual*. Akhirnya diperoleh faktor tersebut sebagai berikut ini :

$$A = 0.5, B = 0.1, x = -0.3, \beta = 0.09 \rho_p^{-0.35}$$

Sehingga, persamaan 3.27 menjadi

$$v_{cw} = \frac{f_c'^{-0.3}}{0.5+0.1\left(\frac{a}{d}\right)^2} + 0.09 \cdot \rho_p^{0.65} \cdot \left(\frac{f_y}{f_c'}\right) \cdot \frac{a}{a_s} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \dots\dots\dots(3.27)$$

Persamaan (3.27) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.24) sehingga memberikan hasil sebagai berikut ini :

$$V_u = \frac{f_c'^{0.7}}{0.5+0.1\left(\frac{a}{d}\right)^2} A_{str} \cdot \sin\theta + 0.09 \cdot \rho_p^{-0.35} \cdot A_{wp} \cdot \cos\theta \dots\dots\dots(3.28)$$

Dengan : A_{wp} adalah luas ekuivalen tulangan badan yang tegak lurus menyilang *strut* dan bisa dihitung sebagai berikut ini :

$$A_{wp} = A_v \cdot \cos\theta + A_h \cdot \sin\theta = \rho_p \cdot A_{str(t)} \dots\dots\dots(3.29)$$

Dengan : A_v , A_h adalah luas vertikal dan horizontal tulangan yang menyilang *strut*. Berdasarkan persamaan (3.27), v_w bisa dihitung sebagai berikut ini :

$$v_w = 0.09 \cdot \rho_p^{0.65} \cdot \left(\frac{f_y}{f_c'} \right) \cdot \frac{a}{a_s} \cdot \frac{1}{\sin\theta} v_w \dots\dots\dots(3.30)$$

$$v_w = 0.09 \cdot \rho_p^{-0.35} \cdot \frac{A_{wp} \cdot f_y}{A_{str} \cdot f_c'} \cot\theta = 0.09 \cdot \rho_p^{-0.35} \cdot \frac{F_{p(max)}}{C_{max}} \cot\theta \dots\dots\dots(3.31)$$

Dengan : $F_{p(max)}$, C_{max} adalah gaya tarik tegak lurus terpakai dan gaya tekan diagonal maksimum terpakai yang mana bisa diaplikasikan dalam *strut*.

Hal itu mengindikasikan bahwa peningkatan kuat tarik transversal *strut* beton melawan kuat tekan longitudinalnya, bisa memperbaiki efek *softening* pada *strut* beton.

Karena persamaan $0.09 \cdot \rho_p^{-0.35}$ dalam persamaan (3.30) merupakan turunan pertama dari v_w versus dengan ρ_p yang merupakan turunan fungsi, berarti bahwa penambahan tulangan badan di balok tinggi beton dengan jumlah tulangan badan sedikit, secara signifikan akan lebih efektif daripada balok dengan tulangan badan banyak. Juga untuk balok tinggi beton mutu tinggi untuk menunjukkan kegagalan geser daktail, itu memerlukan lebih banyak tulangan badan daripada balok beton mutu normal.

Dalam persamaan (3.30), $(0.09 \cdot \rho_p^{-0.35} f_y)(A_{wp})$ bisa disubstitusikan dengan rata-rata gaya tahanan efektif ekuivalen tegak lurus

retak diagonal, sehingga tulangan diperlakukan untuk menurunkan tegangan daripada f_y , sama dengan $(0.09 \cdot \rho_p^{-0.35} f_y)$.

Itu disimpulkan bahwa rata-rata tegangan dari tulangan badan tergantung pada jumlahnya.

3.9.4. Final Desain

Dalam persamaan yang diusulkan, menunjukkan rasio rata-rata kuat geser eksperimen-prediksi mendekati 1,0, itu tidak bisa diaplikasikan untuk mendesain dan oleh karena itu harus dimodifikasi. Persamaan ini dimodifikasi dengan mengalikan koefisien 0,72, oleh karena itu persamaannya menjadi :

$$V_u = \frac{f_c^{0.7}}{0.7+0.15\left(\frac{a}{d}\right)^2} A_{str} \cdot \sin\theta + 0.065 \cdot \rho_p^{-0.35} \cdot A_{wp} \cdot \cos\theta \quad \dots\dots\dots(3.32)$$