

BAB III

ANALISIS DAN DISAIN *FLAT PLATE* BETON PRATEGANG

3.1 Pengertian

Analisis *flat plate* beton prategang adalah suatu proses penentuan parameter-parameter yang berkaitan dengan perencanaan struktur *flat plate* beton prategang. Parameter yang dimaksudkan di sini meliputi dimensi, luas penulangan, tegangan tendon dan beton dan sebagainya.

Sedangkan disain *flat plate* beton prategang adalah proses penentuan dimensi penampang dan kemampuan struktur *flat plate* beton prategang untuk dapat menahan perilaku-perilaku struktur pelat yang terjadi, seperti gaya lentur, gaya geser dan lendutan.

3.2 Disain Pendahuluan

3.2.1 Analisis Penampang *Flat Plate* Beton Prategang

Penampang *flat plate* beton prategang direncanakan dengan memperhitungkan tahanan minimum yang diperlukan pada kekuatan batas tertentu. Untuk masing-masing nilai tahanan rencana, diperhitungkan harus lebih besar atau sama dengan jumlah beban rencana yang diperoleh dengan mengalikan beban-beban eksternal terhadap faktor-faktor beban yang telah ditetapkan.

Untuk mendisain ketebalan *flat plate* beton prategang beberapa ahli telah memberikan batasan untuk mempermudah dalam disain. Menurut Arthur H. Nilson tebal pelat beton prategang diambil antara $1/45$ sampai $1/50$ dari panjang bentangan.

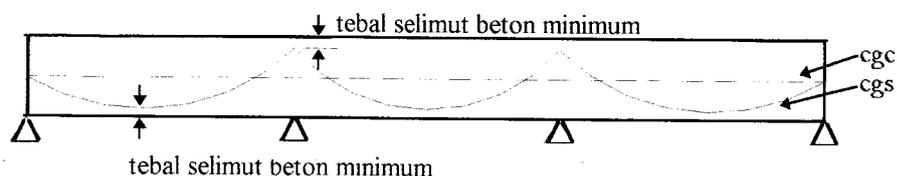
Sedangkan Antonie E. Naaman memberikan nilai tebal pelat untuk muatan hidup sebesar $2,4 \text{ kN/m}^2$ biasanya diambil antara $1/40$ sampai dengan $1/55$ dari panjang bentang. Untuk tebal pelat yang lebih kecil dari $1/55$ dipakai pelat dengan balok atau pelat dengan penebalan keliling kolom (*drop panel*). Dalam perencanaan ini diambil pendekatan tebal pelat :

$$h = \frac{L}{45} \dots\dots\dots (3.1)$$

Tebal selimut beton (pb) yang dianjurkan berkisar antara 19 mm sampai dengan 32 mm untuk pelat yang ditumpu tidak bebas, sedang pelat yang ditumpu bebas adalah 19 mm sampai dengan 50 mm.

3.2.2 Penempatan Profil Tendon

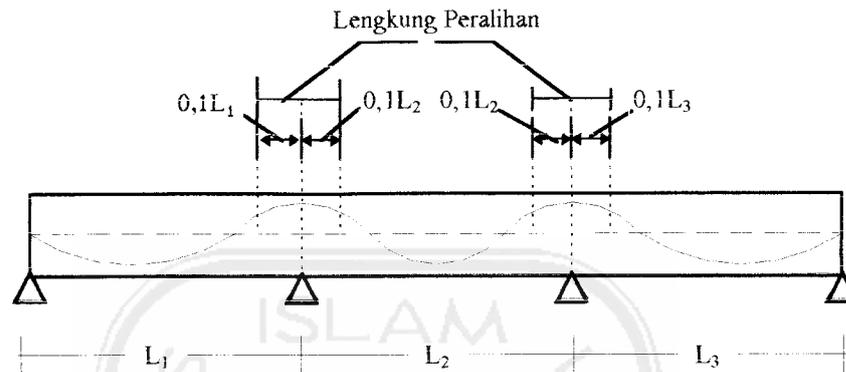
Untuk mendapatkan disain yang lebih ekonomis, gaya prategang harus diperhitungkan seefektif mungkin, jadi pada perletakan dalam, letak kabel harus seatas mungkin dan bagian lapangan harus sebawah mungkin, diusahakan letak garis c.g.s bertemu dengan garis c.g.c pada tumpuan ujung, seperti diperlihatkan pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Tata Letak Tendon Ideal

Pada gambar di atas merupakan tata letak tendon dalam perhitungan, pada kenyataannya tata letak tendon ini tidak dapat digunakan karena adanya belokan tajam pada tumpuan dalam, tata letak tendon yang sebenarnya akan membentuk kurva

terbalik yang disebut lengkung peralihan. Panjang dari lengkung ini adalah 0,1 dari panjang tiap bentangan seperti ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Tata Letak Tendon Sebenarnya

Dalam konsep *load balancing* lengkung peralihan pada gambar di atas dapat diabaikan dalam disain, sehingga tata letak tendon ideal menjadi titik penentu dalam perencanaan (T.Y.Lin, 1993).

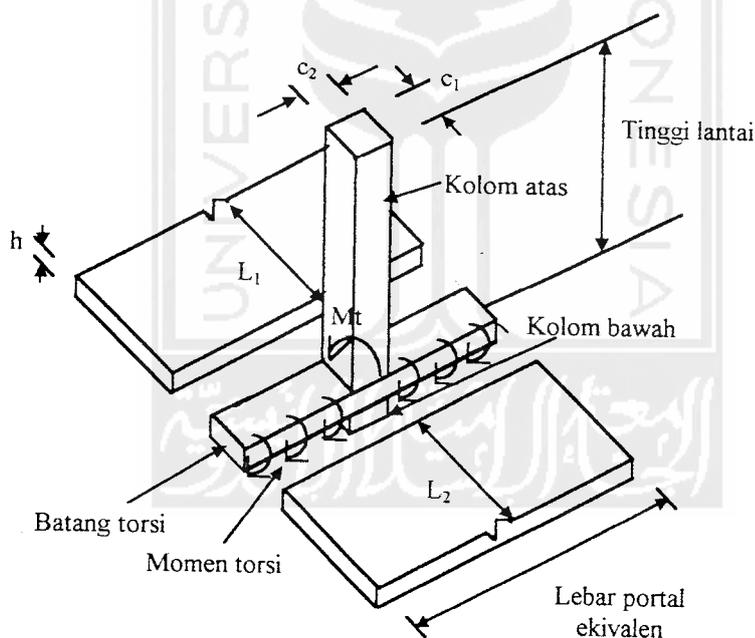
3.2.3 Tegangan Rata-rata

Tegangan rata-rata adalah gaya prategang akhir (setelah kehilangan prategangan) dibagi dengan luas penampang total dari beton. Menurut ACI untuk pelat beton prategang dengan *unbonded tendon*, tegangan rata-rata minimum adalah 0,86 dan maksimum adalah 3,5 MPa. Nilai minimum ini dimaksudkan untuk membatasi adanya tarikan dan keretakan yang berlebihan, sedangkan harga maksimum dimaksudkan untuk membatasi adanya perpendekan elastis dan *creep* yang berlebihan (Antonie E. Naaman, 1982).

3.3 Analisa Struktur *Flat Plate*

3.3.1 Pendekatan Portal Ekuivalen

Pendekatan portal ekuivalen digunakan untuk menganalisis distribusi momen total pada pelat dua arah. Pada pendekatan ini, struktur dibagi menjadi portal (*frame*) menerus yang berpusat pada kolom dalam masing-masing arah yang saling tegak lurus. Masing-masing portal ini terdiri atas sederetan kolom dan slab lebar dengan balok (*column strips*), di antara garis pusat panel. Berdasarkan statika, beban yang bekerja harus diperhitungkan untuk dua arah yang saling tegak lurus (Edward G. Nawy, 1995).



Gambar 3.3 Batang-Batang Rangka Ekuivalen

Dari gambar 3.3 dapat dilihat bahwa daya dukung terhadap rotasi tidak hanya dipengaruhi oleh kekakuan lentur dari kolom-kolom, tetapi juga oleh kekakuan puntir dari gelagar jalur pelat. Dengan adanya tahanan puntiran M_t pada kolom, maka penampang pada kolom tersebut akan berotasi dengan sudut yang lebih kecil dari

penampang-penampang lainnya yang bekerja momen torsi, hal ini disebabkan adanya deformasi puntir pada penampang tersebut. Untuk memperhitungkan deformasi torsional balok tumpuan, dipakai kolom ekuivalen yang fleksibilitasnya merupakan jumlah dari fleksibilitas kolom aktual dan fleksibilitas balok transversal atau jalur slab.

Asumsi ini dirumuskan dengan persamaan :

$$\frac{1}{K_{ec}} = \frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t} \quad (3.2)$$

Atau dapat dirumuskan :

$$K_{ec} = \frac{\sum K_c}{1 + (\sum K_c / K_t)} \quad (3.3)$$

Kekakuan kolom untuk portal ekuivalen :

$$K_c = \frac{4E I}{L_n - 2h} \quad (3.4)$$

Kekakuan torsional balok transversal pada jalur kolom :

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs} C}{L_2 (1 - c_2/L_2)} \quad (3.5)$$

dengan besar konstanta torsional $C = \sum (1 - 0,63x/y) x^3 y/3$

Kekakuan slab dirumuskan :

$$K_s = \frac{4E_{cs} I_s}{L_n - c_1/2} \quad (3.6)$$

Faktor distribusi untuk momen jepit ujung (FEM) adalah :

$$DF = \frac{K_s}{\sum K} \quad (3.7)$$

dengan $\sum K = K_{ec} + K_{s(kiri)} + K_{s(kanan)}$

Besar momen jepit ujung dihitung dengan $wl^2/12$ dan faktor induksi (COF) sebesar 0,5. Selanjutnya besarnya momen disain dapat dicari dengan menggunakan metode Cross.

3.3.2 Momen Disain

Momen disain dengan pendekatan teori statis didapatkan dengan kombinasi distribusi momen rangka M_u yang dihasilkan dari penjumlahan beban mati dan beban hidup berfaktor dengan momen sekunder M_s yang dihasilkan dari tendon. Metode *load balancing* memperhitungkan kedua momen primer M_p dan momen sekunder M_s . Oleh karena itu, untuk nilai beban layan (*service load*), hanya beban unbalance W_{unb} yang diperhitungkan dalam momen jepit ujung (FEM), dan W_{bal} digunakan untuk analisa kekuatan lentur (Edward G. Nawy, 1995).

Jika $M_p = P_e e$ adalah momen primer, dan M_{bal} adalah momen yang dihasilkan oleh W_{bal} , maka momen sekunder dapat dicari dengan persamaan :

$$M_s = M_{bal} - M_p \dots\dots\dots (3.8)$$

Jika \overline{M}_u adalah FEM yang dihasilkan oleh beban terfaktor W_u , maka momen disain dirumuskan dengan persamaan :

$$M_u = \overline{M}_u - M_s \dots\dots\dots (3.9)$$

Momen disain tersebut di atas dalam perencanaan harus dikalikan dengan faktor reduksi yang disyaratkan oleh SK SNI T 15 1991.

3.4 Analisis Lentur

3.4.1 Tegangan Lentur Ijin

Pada saat transfer beban yang terjadi hanyalah beban mati sedangkan pada saat layan beban yang terjadi merupakan beban hidup dan beban mati. Penjumlahan tegangan-tegangan yang terjadi pada kedua keadaan tersebut harus lebih kecil atau sama dengan tegangan-tegangan total yang diijinkan.

SK SNI T 15 1991 pasal 3.11.4, mensyaratkan tegangan ijin yang terjadi pada serat terluar baik pada saat transfer maupun saat layan diatur sebagai berikut :

1. Tegangan beton segera setelah transfer gaya prategang (sebelum kehilangan prategang), tidak boleh melampaui nilai berikut :
 - a) serat terluar yang mengalami tekan adalah $0,6f_{ci}$,
 - b) serat terluar yang mengalami tarik adalah $0,25\sqrt{f_{ci}}$,
 - c) serat terluar pada ujung komponen struktur yang didukung secara sederhana mengalami tegangan tarik adalah $0,5\sqrt{f_{ci}}$,

Bila tegangan tarik melampaui nilai tersebut di atas, maka harus dipasang tulangan tambahan (non pratekan atau pratekan), yang dihitung berdasarkan asumsi suatu penampang utuh.

2. Tegangan beton pada saat *service load* (setelah memperhitungkan semua kehilangan prategang), tidak boleh melampaui nilai berikut :
 - a) serat terluar yang mengalami tegangan tekan adalah $0,45f_c$,
 - b) serat terluar dalam daerah tarik adalah $0,5\sqrt{f_c}$.

Persamaan tegangan beton adalah sebagai berikut :

$$f = \frac{P}{A_c} \pm \frac{M}{S} \dots\dots\dots (3.10)$$

Tulangan tambahan untuk struktur *flat plate* yang didefinisikan sebagai pelat masif dengan tebal merata, luas minimum dan distribusi tulangnya harus memenuhi ketentuan berikut :

1. tulangan lekatan tidak diperlukan pada daerah momen positif apabila tegangan tarik beton yang didapatkan pada beban kerja (setelah dikurangi kehilangan prategang) tidak melampaui $\sqrt{f_c}/6$,
2. apabila tegangan tarik beton pada daerah positif yang didapat dari perhitungan beban kerja melampaui $\sqrt{f_c}/6$, luas minimum tulangan lekatan harus dihitung sebesar :

$$A_s = \frac{N_c}{0,5 f_y} \dots\dots\dots (3.11)$$

tulangan lekatan harus didistribusikan merata pada daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan sedekat mungkin pada serat terluar penampang dan tegangan leleh rencana f_y tidak melampaui 400 Mpa,

3. dalam daerah momen negatif pada kolom penumpu, luas tulangan lekatan minimum dalam setiap arah harus dihitung dengan :

$$A_s = 0,00075 h l \dots\dots\dots (3.12)$$

tulangan lekatan didistribusikan dalam suatu lebar pelat antara dua garis yang berjarak $1,5 h$ di luar muka kolom yang berhadapan. Paling sedikit dalam setiap arah harus dipasang empat batang tulangan dan jarak spasi tulangan tidak boleh lebih dari 300 mm.

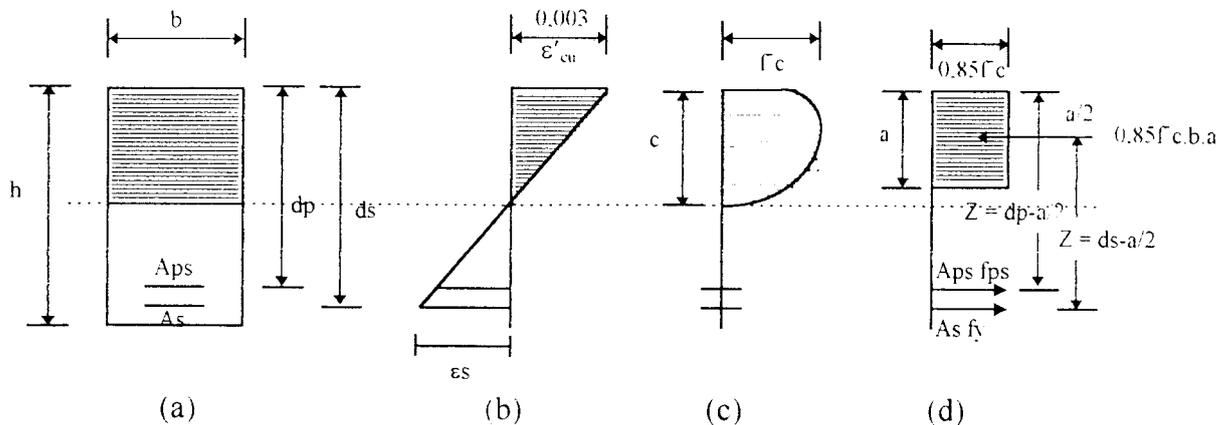
3.4.2 Analisis Lentur pada Saat Kekuatan Batas (Ultimit)

Beton prategang yang dipakai dalam perencanaan *flat plate* menggunakan konstruksi beton yang penampangnya mempunyai dua macam tulangan, yaitu tulangan aktif (kabel prategang) dan tulangan pasif (tulangan non prategang) atau yang disebut beton prategang parsial. Pada beton prategang parsial tegangan tarik diperbolehkan, tetapi kemungkinan retak sangat kecil dengan kata lain tegangan tarik yang timbul harus lebih kecil dari kekuatan ijin tarik beton (Winarni Hadipratomo, 1994).

Untuk menentukan momen ketahanan nominal suatu penampang beton prategang, hal yang harus diketahui yaitu dimensi penampang, sifat bahan dan jumlah penulangan. Dalam menentukan momen ketahanan nominal diperlukan suatu anggapan-anggapan sebagai berikut :

1. penampang yang rata tetap rata setelah pembebanan, akibatnya diasumsikan bahwa ada distribusi regangan linier sepanjang penampang beton sampai beban batas,
2. terdapatnya rekatan yang sempurna antara baja dan beton, hasil langsung dari asumsi ini bahwa perubahan regangan baja sama dengan perubahan regangan beton pada beban yang sama,
3. batas regangan tekan beton, $\epsilon_{cu} = 0,003$,
4. kekuatan tarik beton diabaikan, $f_{ct} = 0$,
5. blok tegangan tekan didekati dengan blok tegangan tekan persegi dengan tegangan merata $0,85 f'_c$ dengan lebar balok b dan tinggi $a = \beta_1 c$,

Analisa tegangan dan regangan serta kopel tegangan dalam pada kondisi kekuatan batas diperlihatkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Blok Tegangan dan Regangan Batas yang Diasumsikan

Pada gambar 3.4a, diperlihatkan suatu penampang beton prategang persegi dengan baja prategang A_{ps} ditempatkan dalam jarak d_p dan tulangan non prategang A_s dalam jarak d_s dari sisi tekan atas. Pada saat kondisi ultimit, regangan tarik baja (tendon) sama dengan saat beton tekan mencapai regangan batas (0,003) seperti ditunjukkan oleh gambar 3.4b.

Distribusi tegangan tekan beton pada penampang tersebut berupa garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral, dari gambar 3.4c tampak bahwa f_c yang merupakan tegangan maksimum posisinya tidak pada serat tepi terluar tetapi agak masuk ke dalam. Untuk tujuan penyederhanaan, Whitney memberi usulan merubah menjadi bentuk persegi panjang dengan intensitas tegangan beton ditentukan sebesar $0,85f_c$ dan dianggap bekerja pada daerah tekan selebar b dan sedalam a , seperti diperlihatkan pada gambar 3.4d (Istimawan Dipohusodo, 1994).

Gaya tarik dan gaya tekan dalam yang timbul pada penampang beton, arah garis kerjanya sejajar tetapi berlawanan arah dan dipisahkan sejauh z , sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam maksimum yang disebut momen kapasitas nominal penampang tertlentur. Untuk menentukan jarak z pada gambar 3.4d, harus dicari dulu

nilai a yang didapat dari keseimbangan gaya-gaya dari blok tegangan pada gambar 3.4 yang akan menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$0,85 f_c b a = A_{ps} f_{ps} + A_s f_y \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

Dari persamaan di atas, maka nilai a dapat dihitung,

$$a = \frac{A_s f_y - A_{ps} f_{ps}}{0,85 f_c b} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

Momen kapasitas nominal penampang tersebut didapatkan dengan persamaan berikut :

$$M_n = A_s f_y (d_s - a/2) + A_{ps} f_{ps} (d_p - a/2) \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

Dalam penentuan harga f_{ps} dapat dicari berdasarkan ketentuan berikut, harga ini dapat dipakai bila gaya prategang efektif, f_{se} lebih besar dari $0,5f_{pu}$.

1. Untuk struktur yang menggunakan *unbonded tendon* dan perbandingan antara panjang bentang terhadap tinggi struktur tidak lebih dari 35,

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f_c}{100\rho_p} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

dengan batasan : $f_{ps} < f_{py}$

$$f_{ps} < f_{se} + 400$$

2. Untuk struktur yang menggunakan *unbonded tendon* dan perbandingan antara panjang bentang terhadap tinggi komponen struktur lebih dari 35,

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f_c}{200\rho_p} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

dengan batasan : $f_{ps} < f_{pu}$

$$f_{ps} > f_{se} + 200$$

Momen kapasitas nominal beton setelah dikalikan dengan faktor reduksi harganya harus lebih besar dibandingkan dengan kekuatan momen yang diakibatkan oleh beban (M_u), seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$\phi M_n \geq M_u \dots\dots\dots (3.18)$$

Bila didapatkan bahwa kapasitas nominal rencana lebih kecil dari momen yang terjadi, maka dilakukan disain ulang dengan alternatif berikut :

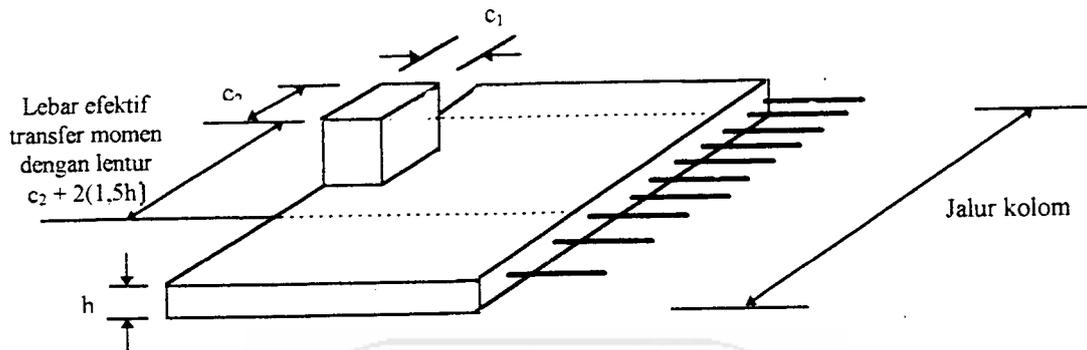
1. menambah penulangan non prategang, atau tulangan prategang.
2. bila mungkin menambah eksentrisitas tendon,
3. merubah mutu bahan atau dimensi penampang.

3.5 Transfer Momen dari Pelat ke Kolom

Apabila ada momen-momen utama yang disalurkan dari pelat ke kolom yang terjadi karena tidak seimbang beban-beban gravitasi di kedua sisi kolom, atau adanya pembebanan horisontal akibat angin atau gempa, maka tegangan geser pada penampang kritis tidak lagi terdistribusi secara seragam. Sebagian dari momen tidak seimbang harus dianggap disalurkan sebagai lentur yang bekerja pada lebar pelat efektif di antara garis-garis yang jauhnya 1,5 kali tebal pelat dari kolom tumpuannya.. untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.5 (Arthur H. Nilson, 1993).

Koefisien transfer momen tak seimbang sebagai lentur diberikan oleh SK SNI T 15 1991 pasal 3.6.3.3 sebesar :

$$\gamma_t = \frac{1}{1 + 2/3 \sqrt{(c_1 + d)(c_2 + d)}} \dots\dots\dots (3.19)$$



Gambar 3.5 Bidang Kritis Akibat Momen Transfer Sebagai Lentur

Momen kapasitas penampang pada lebar efektif tersebut harus lebih besar dari momen tidak seimbang dikalikan dengan koefisien transfer.

$$\phi M_n \geq \gamma_f M_t \dots \dots \dots (3.20)$$

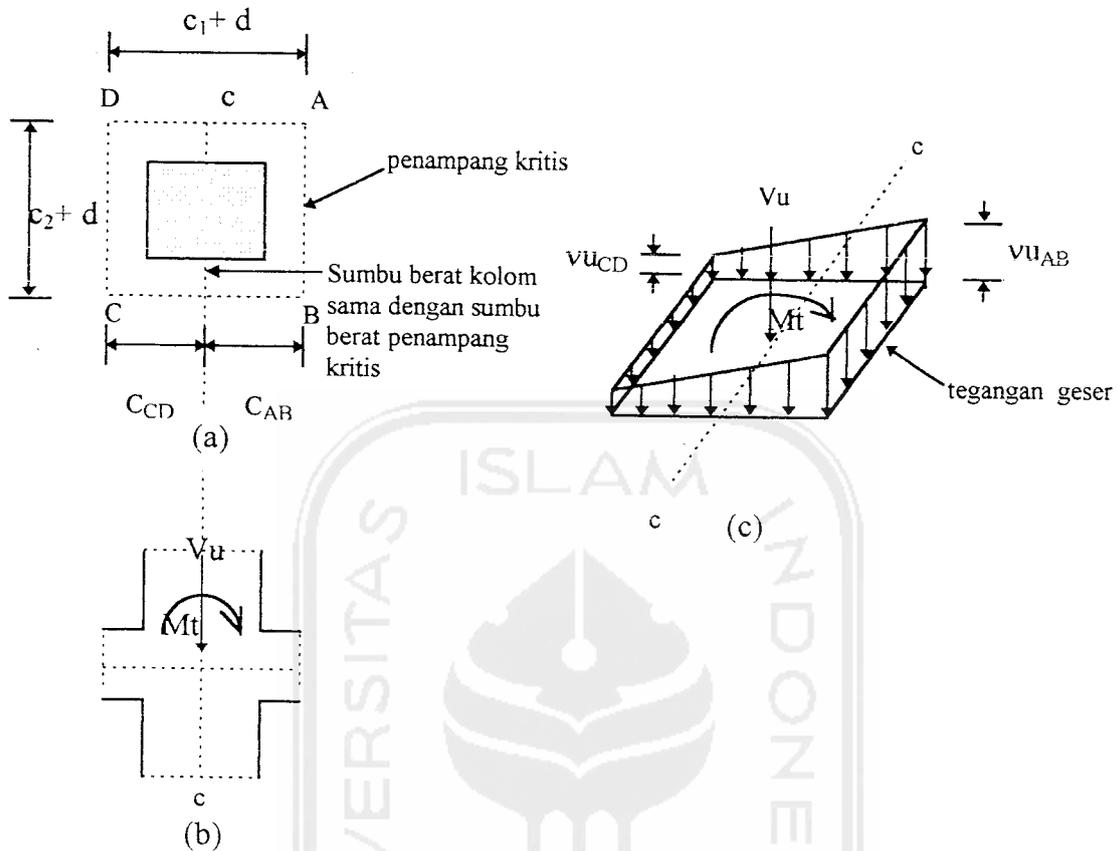
Sisa dari momen yang ditransfer oleh lentur tersebut dianggap sebagai geser eksentris terhadap pusat dari penampang kritis yang jaraknya $d/2$ dari perimeter kolom. Koefisien transfer geser dirumuskan persamaan 3.21.

$$\gamma_v = 1 - \gamma_f \dots \dots \dots (3.21)$$

Faktor geser dan faktor momen tidak seimbang yang ditransfer sebagai geser apabila disuperposisikan akan menghasilkan tegangan geser maksimum yang digunakan untuk perencanaan geser. Selanjutnya masing-masing distribusi tegangan geser di sekitar kolom dapat dilihat pada penjelasan berikut ini.

1. Kolom interior,

Gaya geser rencana V_u dan momen rencana tak seimbang M_u pada gambar 3.6b dianggap bekerja pada muka kolom dan harus ditransfer ke sumbu berat penampang kritis, yaitu sumbu c-c.



Gambar 3.6 Distribusi Tegangan Geser pada Kolom Interior

Dari gambar 3.6a dapat dicari luas penampang kritis A_c , jarak dari pusat berat ke sebelah kiri dan kanan penampang kritis penampang terluar c dan momen inersia polar J_c pada kolom interior dapat dicari.

$$A_c = 2(c_1 + c_2 + 2d)d \dots\dots\dots (3.22)$$

$$J_c = \frac{d(c_1 + d)^3}{6} + \frac{(c_1 + d)d^3}{6} + \frac{d(c_2 + d)(c_1 + d)^2}{2} \dots\dots\dots (3.23)$$

$$C_{AB} = C_{CD} = 0,5(c_1 + d) \dots\dots\dots (3.24)$$

Momen tak seimbang dan reaksi vertikal yang diteruskan ke kolom, menyebabkan tegangan geser yang besarnya dianggap berubah secara linier dengan

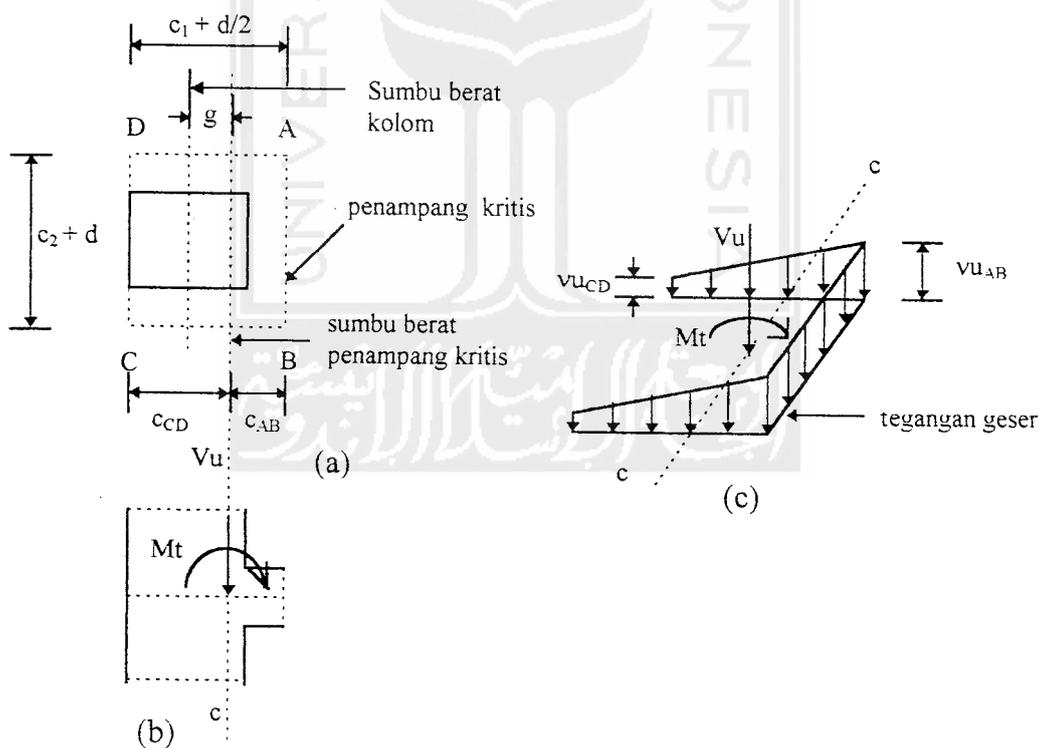
bertambahnya jarak dari pusat penampang kritis, seperti pada gambar 3.6c. Besar tegangan geser yang disuperposisikan dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$v_{uAB} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_t C_{AB}}{J_c} \dots\dots\dots (3.25)$$

$$v_{uCD} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v M_t C_{CD}}{J_c} \dots\dots\dots (3.26)$$

Dengan cara seperti di atas, maka dapat dicari tegangan geser maksimum untuk kolom eksterior dan kolom sudut.

2. Kolom eksterior,



Gambar 3.7 Distribusi Tegangan Geser pada Kolom Eksterior

Besar tegangan geser dihitung dengan persamaan berikut :

$$v_{uAB} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v (M_t - V_u g) C_{AB}}{J_c} \dots\dots\dots (3.27)$$

$$v_{uCD} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v (M_t - V_u g) C_{CD}}{J_c} \dots\dots\dots (3.28)$$

dengan,

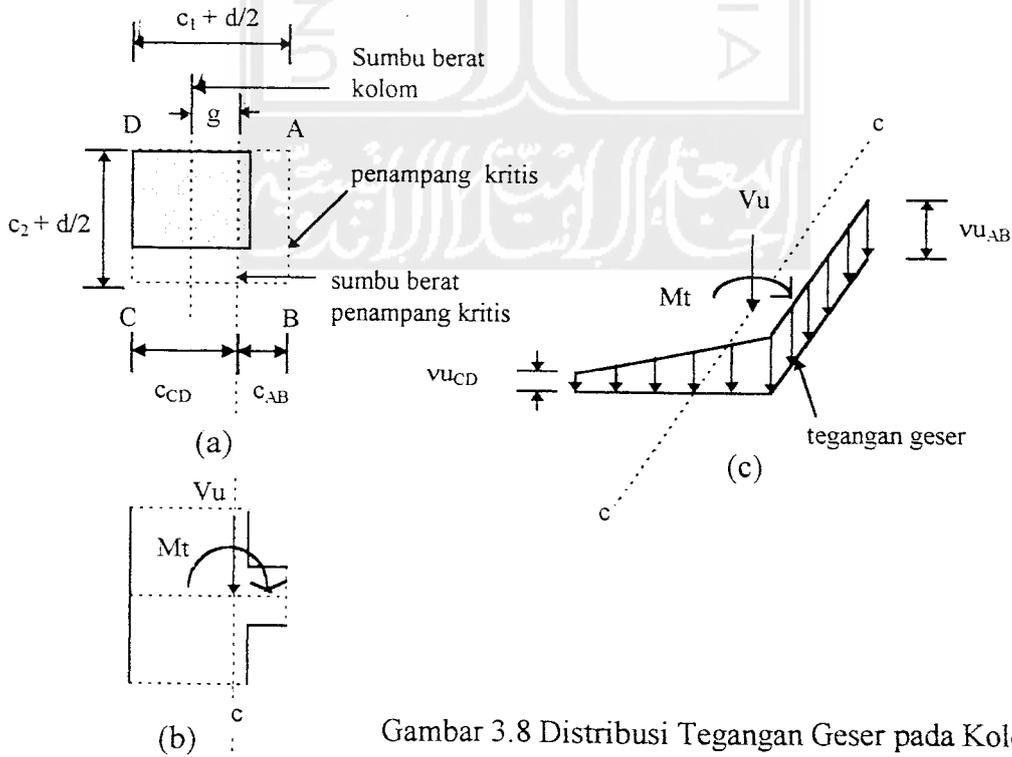
$$A_c = (2c_1 + c_2 + 2d) d \dots\dots\dots (3.29)$$

$$C_{AB} = \frac{(c_1 + d/2)^2 d}{A_c} \dots\dots\dots (3.30)$$

$$C_{CD} = (c_1 + d/2) d - C_{AB} \dots\dots\dots (3.31)$$

$$J_c = \frac{(c_1 + d/2) d^3}{6} + \frac{2d}{3} (C_{AB}^3 + C_{CD}^3) + (c_2 + d) d (C_{AB}^2) \dots\dots\dots (3.32)$$

3. Kolom sudut,



Gambar 3.8 Distribusi Tegangan Geser pada Kolom Sudut

Besarnya tegangan geser yang disuperposisikan dihitung dengan persamaan :

$$V_{uAB} = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v (M_t - V_u g) C_{AB}}{J_c} \quad (3.33)$$

$$V_{uCD} = \frac{V_u}{A_c} - \frac{\gamma_v (M_t - V_u g) C_{CD}}{J_c} \quad (3.34)$$

dengan,

$$A_c = (c_1 - c_2 + d) d \quad (3.35)$$

$$C_{AB} = \frac{1/2(c_1 - d/2)^2 d}{A_c} \quad (3.36)$$

$$C_{CD} = (c_1 - d/2) - C_{AB} \quad (3.37)$$

$$g = C_{CD} - c_1/2 \quad (3.38)$$

$$J_c = \frac{d(c_1 - d/2)^3}{12} + \frac{d^3(c_1 + d/2)}{12} + d(c_1 + d/2) \left[\frac{(c_1 + d/2)}{2} - C_{AB} \right]^2 + d(c_2 - d/2) C_{AB}^2 \quad (3.39)$$

3.6 Analisis Geser

3.6.1 Kapasitas Geser Beton

Analisa gaya geser pada *flat plate* dilakukan dengan menganggap bahwa gaya geser V_u ditahan oleh tahanan geser yang terdistribusi secara seragam di sekeliling penampang kritis b_o pada suatu jarak sebesar $d/2$ dari sisi kolom pendukungnya yang sering disebut sebagai daerah *punching shear* (geser pons).

SK SNI T 15 1991 pasal 3.4.12.4 memberikan batasan kapasitas geser yang dapat ditahan oleh kolom beton prategang pada pelat dua arah adalah sebagai berikut :

$$V_c = 0,3 \sqrt{f_c} + 0,3 f_{pc} + \frac{V_p}{b_o d} \dots\dots\dots (3.40)$$

Persamaan 3.40 dapat digunakan jika dipenuhi syarat-syarat di bawah ini :

1. tidak ada bagian dari penampang kolom yang jaraknya lebih dekat dari 4 kali tebal pelat ke suatu tepi yang tidak menerus,
2. f_c tidak boleh diambil lebih besar dari 35 Mpa,
3. f_{pc} pada tiap arah tidak boleh kurang dari 0,9 Mpa dan tidak boleh lebih dari 3,5 Mpa.

Bila tegangan geser ijin tidak memenuhi persamaan 3.40, maka tegangan geser ijin dihitung dengan persamaan untuk beton non prategang, persamaan 3.41.

$$V_c = (1 + 2 \beta_c) \sqrt{f_c} / 6 \leq \sqrt{f_c} / 3 \dots\dots\dots (3.41)$$

3.6.2 Disain Penulangan Geser

Tulangan geser digunakan apabila gaya geser yang terjadi melebihi kapasitas geser beton. Tulangan geser tersebut harus dapat memikul kelebihan gaya geser yang tidak ditahan oleh beton. Kapasitas geser penampang beton apabila dipakai tulangan geser, tidak boleh melampaui $(\sqrt{f_c} / 6) b_o d$.

Jenis-jenis tulangan geser yang dipakai pada perencanaan *flat plate* dapat berupa tulangan biasa yang diangkerkan, profil kepala geser (*shearhead*) berupa profil baja I atau kanal yang saling tegak lurus satu sama lain tanpa pemutusan di dalam penampang kolom. SK SNI T 15 1991 pasal 3.4.5.6 memberikan rekomendasi kuat geser tulangan geser harus dihitung berdasarkan ketentuan sebagai berikut :

1. Untuk tulangan geser yang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur,

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \dots\dots\dots (3.42)$$

2. Bila tulangan geser terdiri dari batang tunggal atau satu group batang tulangan sejajar, dan semuanya dibengkokkan pada jarak yang sama dari tumpuan, maka :

$$V_s = A_v f_y \sin\alpha \leq (\sqrt{f_c}/4) b_o d \dots\dots\dots (3.43)$$

Jarak spasi tulangan geser yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu aksial untuk beton pretegang harus lebih kecil dari $3/4h$ atau 600 mm. Apabila penulangan geser digunakan profil kepala geser (*shearhead*), maka profil baja yang dibuat harus dengan proses las penetrasi penuh membentuk lengan yang sama dan saling tegak lurus. Lengan *shearhead* tersebut tidak boleh terputus di dalam penampang kolom, ujung setiap lengan *shearhead* boleh dipotong membentuk sudut tidak kurang dari 30° terhadap horisontal, apabila kuat momen plastis penampang miring sisa cukup untuk menahan bagian gaya geser yang bekerja padanya.

SK SNI T 15 1991 pasal 3.4.11.4, juga mensyaratkan tinggi profil baja yang digunakan tidak boleh lebih besar dari 70 kali tebal badan profil baja dan semua flens tekan dari profil baja yang digunakan harus ditempatkan dalam jarak $0,3d$ dari bagian permukaan pelat yang tertekan. Besar gaya geser pada seluruh panjang dari lengan *shearhead* adalah konstan dan bagian dari gaya geser total yang ditahan oleh lengan *shearhead* berbanding lurus dengan α_v , yang merupakan perbandingan antara kekakuan lentur relatif dengan penampang beton yang ada disekitarnya.

Besar nilai α_v dihitung dengan persamaan berikut :

$$\alpha_v = \frac{E_s I_s}{E_c I_c} \dots\dots\dots (3.44)$$

Penampang beton yang dipakai mempunyai lebar efektif $c_2 + d$, dengan c_2 merupakan lebar kolom yang diukur tegak lurus terhadap arah lengan. *Shearhead* yang fleksibel ternyata tidak efektif, sehingga SK SNI T 15 1991 mensyaratkan harga kekakuan relatif lengan *shearhead* paling sedikit 0,15.

Shearhead dipasang pada kepala kolom dan dicor pada pelat beton, sehingga antara *shearhead* dan pelat membentuk penampang komposit yang akan bekerja sama dalam menahan geser. *Shearhead* mempunyai pengaruh yang dapat memindahkan letak penampang kritis hingga berada di luar kolom, sehingga akan diperoleh keuntungan ganda yang juga merupakan tujuan dari perencanaan geser pelat yaitu, bertambahnya besar keliling efektif b_o dan berkurangnya gaya geser total.

Penampang kritis geser *flat plate* tegak lurus terhadap bidang pelat dan memotong setiap lengan *shearhead* sejauh $(3/4)[l_v - (c_1/2)]$ diukur dari muka kolom ke ujung lengan *shearhead*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.9.

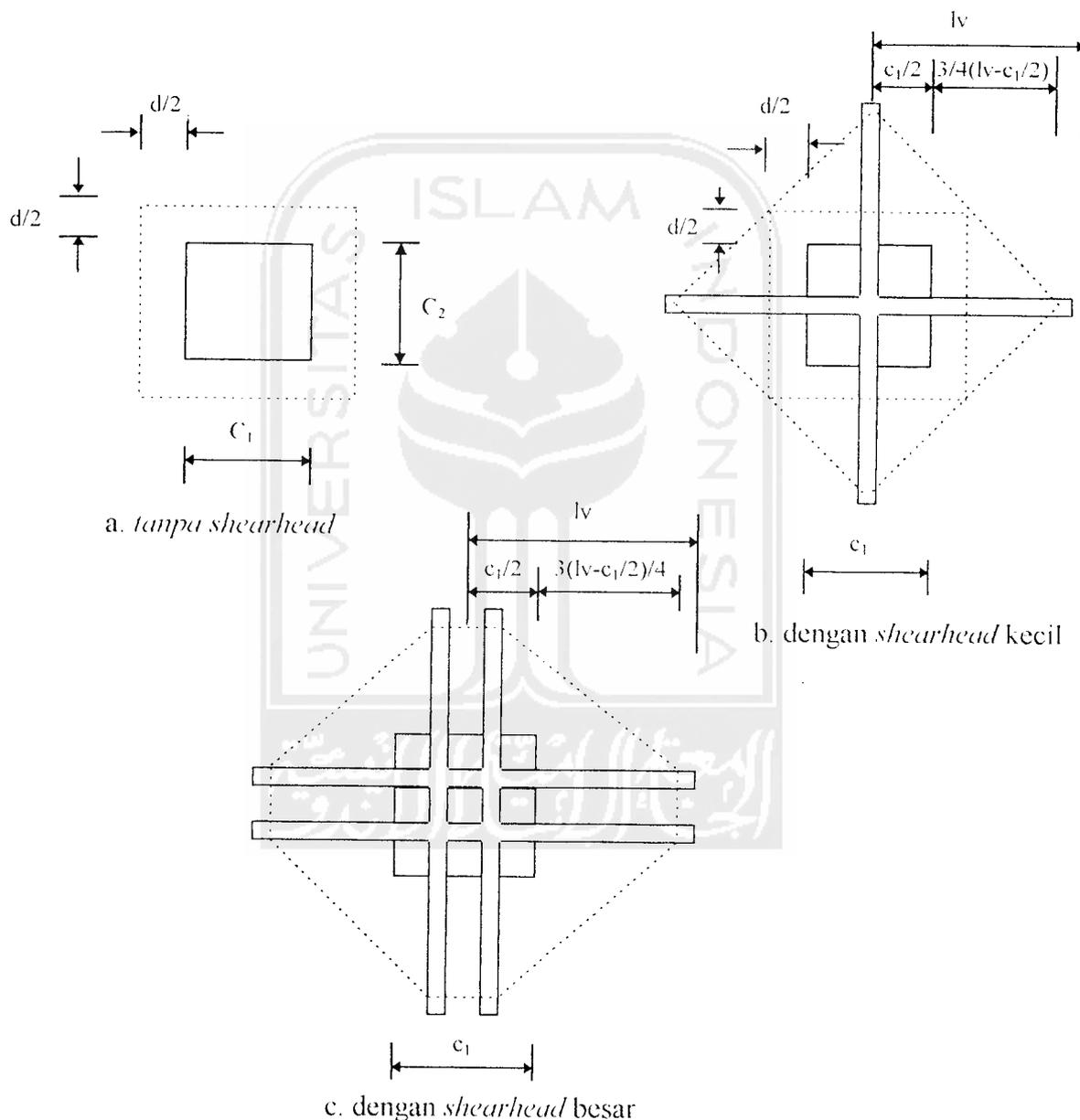
Besar keliling penampang kritis dapat dicari dengan menyamakan V_u dengan kuat geser maksimal pada penampang kritis. Sebagai contoh pada penampang kritis pada gambar 3.9b, dengan menggabungkan kedua persamaan itu, maka besar keliling penampang kritis dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$V_u = \phi(\sqrt{f_c/3}) b_o d \dots\dots\dots (3.45)$$

$$b_o = \frac{3V_u}{d\sqrt{f_c}} \dots\dots\dots (3.46)$$

Panjang profil baja yang dibutuhkan untuk menahan gaya geser (l_v) dapat dihitung dari tinjauan gambar 3.9b. Dengan menggunakan teorema segitiga siku-siku, maka l_v dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\left\{ \frac{3}{4} (l_v - c_1/2) + c_1/2 \right\} \sqrt{2} = b_v/4 \quad (3.47)$$



Gambar 3.9 Penampang Kritis Geser *Flat Plate*

Kuat momen plastis perlu untuk setiap lengan profil penahan geser dihitung dengan persamaan berikut :

$$M_p = \frac{V_u}{\phi 2\eta} [h_v + \alpha_v (L_v - c_1/2)] \dots\dots\dots (3.48)$$

Shearhead tersebut dapat mengurangi momen jalur kolom, karena lebar perletakan efektif bertambah besar. Besar pengurangan momen berbanding lurus dengan ukuran dan bagian dari beban yang ditahan oleh *shearhead*. Besar momen secara konservatif dapat diperkirakan dengan persamaan berikut ini.

$$M_v = \frac{\phi \alpha_v V_u (l_v - c_1/2)}{2\eta} \dots\dots\dots (3.49)$$

SK SNI T 15 1991 memberikan batasan untuk pengurangan momen tersebut tidak boleh lebih besar dari nilai terkecil dari :

1. 30% dari momen terfaktor total yang perlu untuk setiap jalur kolom pelat,
2. perubahan dalam momen jalur kolom sepanjang l_v ,
3. kuat momen plastis perlu (M_p).

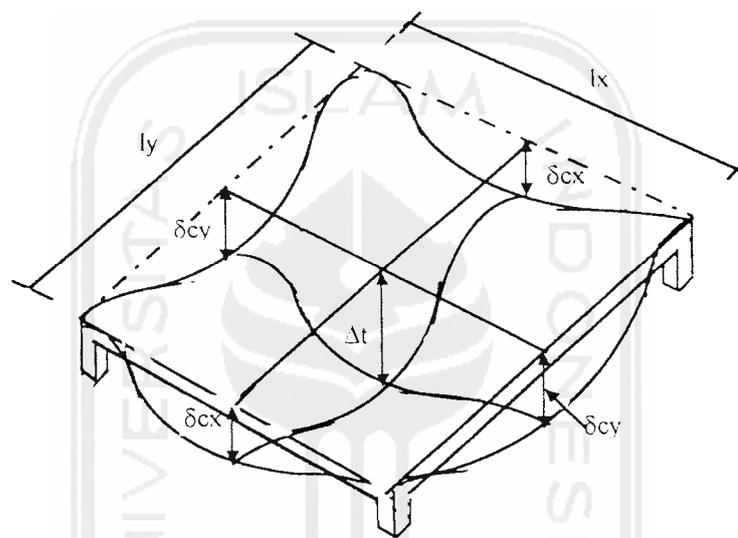
Kuat geser disain terfaktor tidak boleh melampaui kuat geser nominal yang disediakan oleh penampang beton dan tulangan geser.

$$V_u \leq \phi V_n \dots\dots\dots (3.50)$$

SK SNI T 15 1991 pasal 3.4.11 memberikan batasan untuk tulangan geser biasa, kuat geser nominal tidak boleh diambil lebih dari $(0,5\sqrt{f'_c})b_0d$, sedangkan untuk profil kepala geser (*shearhead*) adalah $(0,6\sqrt{f'_c})b_0d$.

3.7 Analisis Lendutan

Lendutan pada *flat plate* terjadi pada dua arahnya dan lendutan maksimum terletak pada tengah bentang dari jalur kolom dalam satu arah ditambah lendutan tengah bentang dari jalur tengah dalam arah lainnya. Untuk lebih jelasnya diperlihatkan dalam gambar 3.10.



Gambar 3.10 Analisa Lendutan pada *Flate Plate*

Lendutan dalam arah X dan Y pada bentang *flat plate* dapat diperhitungkan dengan menjumlahkan komponen lendutan berikut (Edward G. Nawy, 1996) :

1. Perletakan diasumsikan terjepit sepenuhnya, sehingga lendutan dirumuskan :

$$\delta' = \frac{W l^4}{384 E_c I_{frame}} \dots\dots\dots (3.51)$$

Untuk jalur kolom :

$$\delta_c = \delta' \frac{M_{col strip}}{M_{frame}} \frac{E_c I_{cs}}{E_c I_c} \dots\dots\dots (3.52)$$

Untuk jalur tengah :

$$\delta_s = \delta' \frac{M_{\text{slab strip}}}{M_{\text{frame}}} \frac{E_c I_{cs}}{E_c I_s} \dots\dots\dots (3.53)$$

2. Lendutan di tengah bentang, $\delta''\theta L = \theta L/8$, dengan memperhitungkan rotasi ujung kiri sedang ujung kanannya jepit sempurna, θL (bagian kiri) sama dengan M_{net}/K_{ec} dan K_{ec} kekakuan dari kolom yang ekuivalen,

3. Lendutan di tengah bentang, $\delta''\theta R = \theta R/8$, akibat rotasi ujung kanan sedangkan ujung kirinya jepit sempurna, dengan θR sama dengan M_{net}/K_{ec} , sehingga :

$$\delta_{cx} \text{ atau } \delta_{cy} = \delta_c + \delta''\theta L + \delta''\theta R \dots\dots\dots (3.54)$$

$$\delta_{sx} \text{ atau } \delta_{sy} = \delta_s + \delta''\theta L + \delta''\theta R \dots\dots\dots (3.55)$$

Dari persamaan 3.54 dan 3.55, didapatkan total lendutan :

$$\Delta_t = \delta_{sx} + \delta_{cy} = \delta_{sy} + \delta_{cx} \dots\dots\dots (3.56)$$

4. Untuk lendutan pada kedua arah, dijumlahkan lendutan yang terjadi pada kedua arah x dan y,

$$\Delta_t = \frac{(\Delta_{tx} + \Delta_{ty})}{2} \dots\dots\dots (3.57)$$

5. Lendutan total untuk jangka panjang harus memperhitungkan beban yang akan bekerja tetap W_{sust} ,

$$W_{\text{sust}} = (W_{\text{unb}} - WL) + 0,65WL \dots\dots\dots (3.58)$$

$$\delta_{\text{long-t}} = \frac{W_{\text{sust}}}{W_{\text{unb}}} \times \Delta_t \times \text{Faktor Creep} \dots\dots\dots (3.59)$$

6. Total defleksi tengah panel arah x dan y setelah memperhitungkan pengaruh waktu,

$$\Delta_{\text{tot}} = \Delta_t + \delta_{\text{long-t}} \dots\dots\dots (3.60)$$

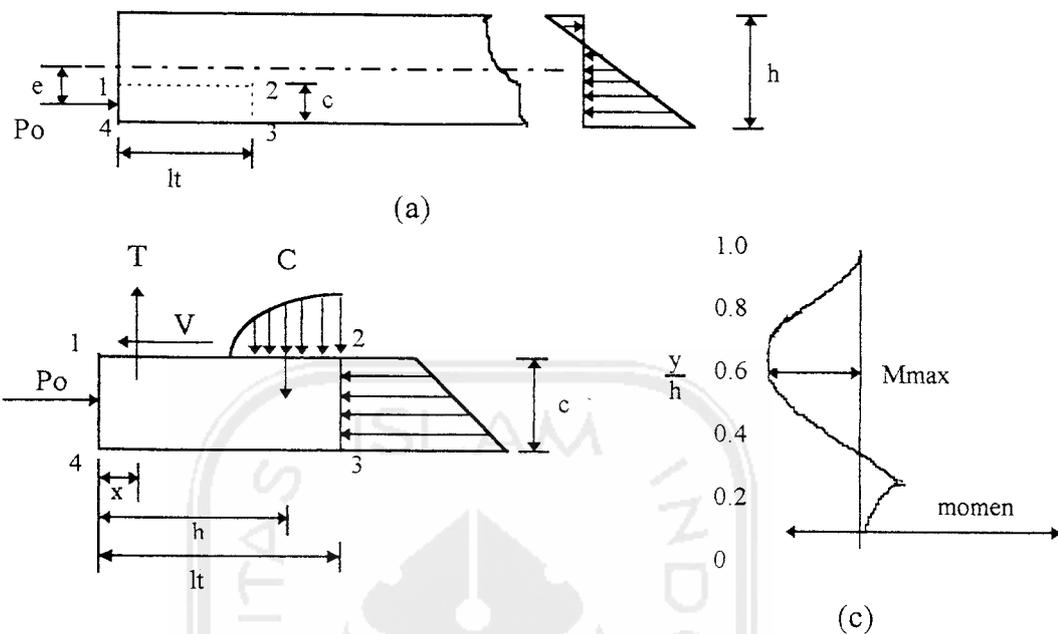
Lendutan yang terjadi tidak boleh melampaui batas lendutan maksimum yang telah ditetapkan oleh SK SNI T 15 1991 pasal 3.2.5.3 seperti yang diperlihatkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Lendutan Maksimum

TIPE KOMPONEN STRUKTUR	LENDUTAN YANG DIPERHITUNGAN	BATAS LENDUTAN
Atap datar tidak menahan atau berhubungan dengan komponen non struktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup, L	$\frac{1}{180}$
Lantai tidak menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan akibat beban hidup, L	$\frac{1}{360}$
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban yang bekerja dan lendutan seketika yang terjadi akibat penambahan sembarang beban hidup)	$\frac{1}{480}$
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau berhubungan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak rusak akibat lendutan yang besar		$\frac{1}{240}$

3.8 Perhitungan *End Block*

Untuk lebih jelasnya mengenai analisis daerah pengankuran diperlihatkan pada gambar 3.11. Gambar 3.11a menunjukkan daerah ujung dari sebuah gelagar pasca tarik dengan gaya prategang awal P_0 dikerjakan pada eksentrisitas e . Pada suatu jarak l_t dari ujung, distribusi tegangan tekan berbentuk linier.



Gambar 3.11 Tegangan pada *End Block*

Gambar 3.11b menunjukkan gaya yang bekerja pada *free body* 1-2-3-4, yang dibatasi oleh ujung-ujung batang dan ujung permukaan sebelah dalam daerah pengangkuran, dengan asumsi retak horizontal. Pada umumnya, dari gaya-gaya horizontal pada permukaan 1-2 akan dihasilkan baik momen maupun geser. Gaya geser yang terjadi ditahan oleh lekatan agregat, sedang daya tahan terhadap momen yang diperlukan diberikan oleh gaya tarik T dari tulangan dan resultan gaya tekan C dari beton, yang diperkirakan bekerja pada suatu jarak h dari ujung permukaan. Tinggi c dari *free body*, yang ditentukan oleh ketinggian retak, ditentukan berdasarkan persyaratan bahwa momen yang terjadi akibat gaya horizontal akan mempunyai harga maksimum pada ketinggian tempat terjadinya retak. Gambar 3.11c merupakan contoh dari diagram momen yang dapat dihasilkan dari perhitungan.

Dalam merencanakan luas pelat angkur, ACI memberikan batasan tegangan beton yang tidak boleh dilampaui,

1. segera setelah pengangkutan,

$$f_b = 0,8f_c \sqrt{A_2/A_1 - 0,2} \leq 1,25f_{ci} \dots\dots\dots (3.61)$$

2. setelah kehilangan prategangan,

$$f_b = 0,6f_c \sqrt{A_2/A_1} \leq f_c \dots\dots\dots (3.62)$$

Perbandingan luasan pelat ekivalen A_2 dengan A_1 diambil maksimal 2,7, dikarenakan pada perbandingan tersebut, penyaluran tegangan dari pelat A_1 ke pelat A_2 masih efektif.

Besar dari tegangan ujung yang akan diantisipasi oleh *end block* dirumuskan :

$$T = \frac{M_{max}}{h - x} \dots\dots\dots (3.63)$$

Kebutuhan tulangan sengkang ujung :

$$A_s = \frac{T}{f_y} \dots\dots\dots (3.64)$$

Untuk beton pasca tarik, sengkang tersebut harus didistribusikan pada jarak $h/2$ dari ujung permukaan.

3.9 Flow Chart Disain Flat Plate Beton Prategang

