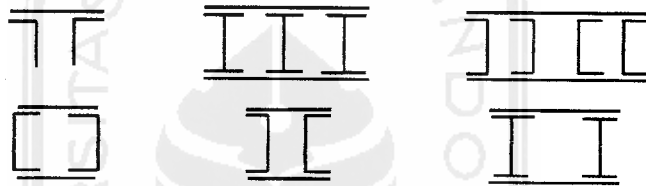


BAB III

LANDASAN TEORI

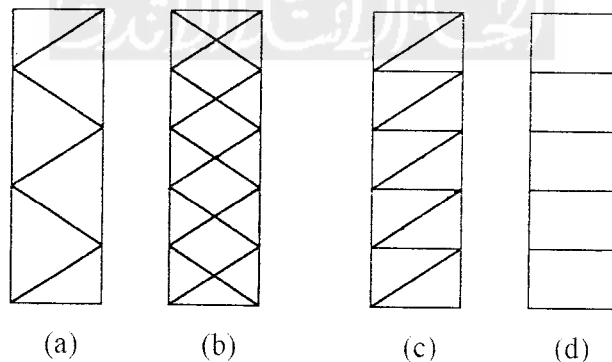
3.1. Kolom Tersusun

Kolom tersusun adalah kolom yang terdiri dari gabungan dua batang atau lebih, satu dengan yang lain dirangkai sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan. Berbagai susunan profil dapat dilihat Gambar 3.1



Gambar 3.1 Berbagai macam profil tersusun

Untuk membentuk kolom tersusun diperlukan perangkai yang berupa plat atau batang. Batang perangkai dapat disusun melintang, diagonal dan kombinasi melintang dan diagonal.



Gambar 3.2. Konfigurasi batang perangkai

Gambar 3.2 menunjukkan berbagai konfigurasi batang perangkai yang umum digunakan, a. ikat tunggal (menggunakan batang perangkai diagonal), b. ikat ganda (menggunakan 2 batang perangkai diagonal), c. ikat dan kopel (menggunakan batang perangkai transversal dan diagonal), d. kopel (menggunakan batang perangkai transversal).

Hubungan batang dengan perangkainya dapat dilaksanakan dengan baut, paku keling dan las. Kolom tersusun sering digunakan pada kondisi-kondisi sebagai berikut : a. kapasitas profil yang tersedia belum mencukupi, b. diperlukan kolom dengan kekuatan besar, c. detail sambungan membutuhkan sambungan tertentu dan, d. faktor estetika.

Ada beberapa hal yang menyebabkan kehancuran pada kolom, diantaranya adalah sifat kolom yang mengalami tekuk elastis atau tekuk inelastik maupun kondisi pembebanan yang terjadi. Sifat kolom yang mengalami suatu tekuk tertentu dipengaruhi oleh angka kelangsingan (*slenderness ratio*). Berdasarkan kelangsingannya, batang tekan atau kolom dapat digolongkan dalam 3 macam, yaitu kolom langsing (*slender column*), kolom sedang (*medium column*), dan kolom gemuk (*stocky column*).

Pada kolom atau batang tekan yang panjang dengan beban yang berat (misalnya pada rangka jembatan), kolom tersusun lebih banyak digunakan karena lebih hemat dibanding menggunakan profil tunggal. Inti dari profil tersusun adalah untuk mendapatkan inersia yang besar sehingga elemen tersebut mempunyai kekakuan besar.

3.2. Kuat Tekan

Kuat tekan kolom dipengaruhi oleh sifat bahan, geometri penampang, derajat pengekangan di ujung-ujung dan panjang batang. Sifat bahan meliputi modulus elastisitas (E), tegangan leleh (F_y), serta tegangan residu. Panjang batang, geometri penampang dan derajat pengekangan di ujung berpengaruh terhadap kelangsingan. Semakin langsing suatu kolom dengan penampang tertentu kuat tekannya semakin kecil.

3.2.1. Panjang Efektif

Panjang efektif kolom adalah jarak antar titik balik batang tersebut, yaitu jarak antar ujung-ujung sendi ekuivalen, baik riil maupun imajiner (Gere dan Timoshenko, 1996). Panjang efektif (L_e) menurut Timoshenko dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.1

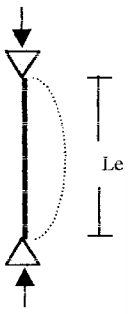
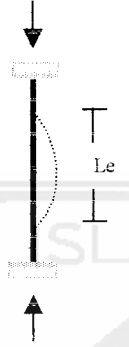
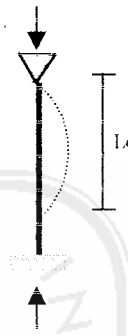
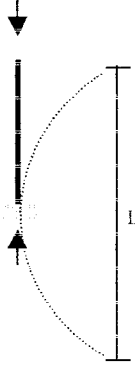
$$L_e = K.L \quad (3.1)$$

dengan : K = faktor panjang efektif

L = panjang batang

Nilai faktor panjang efektif kolom ideal dari berbagai kondisi ujung disajikan pada Tabel 3.1

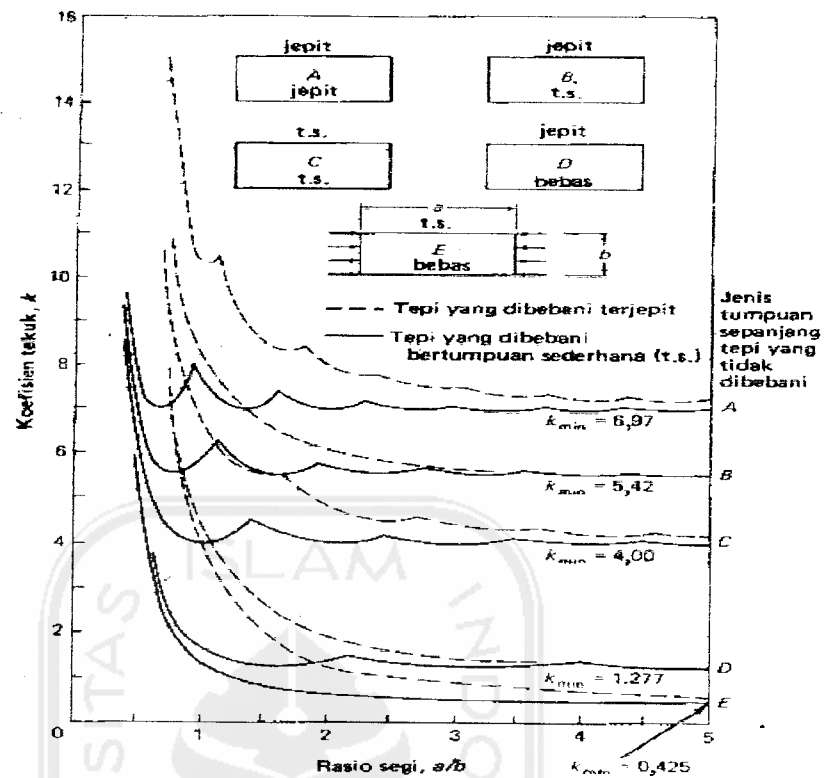
Tabel 3.1 Faktor panjang efektif kolom ideal

Sendi-Sendi	Jepit-Jepit	Jepit-Sendi	Jepit-bebas
			
$Le = L$	$Le = 0,5L$	$Le = 0,7L$	$Le = 2L$
$K = 1$	$K = 0,5$	$K = 0,7$	$K = 2$

Dari tabel 3.1 dapat dilihat bahwa koefisien panjang efektif bervariasi tergantung pada kondisi ujung untuk kolom ideal, misal pada kondisi ujung sendi-sendiri nilai koefisien panjang efektif $K=1$ sehingga panjang efektif kolom (Le) sama dengan panjang kolom (L) tersebut.

3.2.2. Tekuk Lokal

Menurut Lambert Tall, 1974, maupun Salmon dan Johnson, 1990, tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada salah satu elemen penyusun tampang suatu struktur. Keruntuhan akibat tekuk lokal ini terjadi pada batang yang langsing

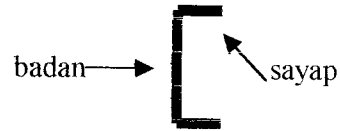


Gambar 3.3. Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar (Salmon dan Johnson, 1994)

Gambar 3.3 memperlihatkan variasi koefisien tekuk k terhadap rasio a/b untuk kondisi tepi yang berbeda-beda, yaitu beberapa kombinasi jepit, tumpuan sederhana dan bebas. Nilai kekakuan terbesar terjadi pada kondisi tumpuan berupa tumpuan jepit-jepit dengan $k=6,97$, nilai kekakuan tumpuan jepit-tumpuan sederhana dengan $k = 5,42$, nilai kekakuan tumpuan jepit-bebas dengan $k = 1,277$, sedangkan nilai kekakuan untuk kombinasi tumpuan sederhana dan bebas dengan $k=0,425$.

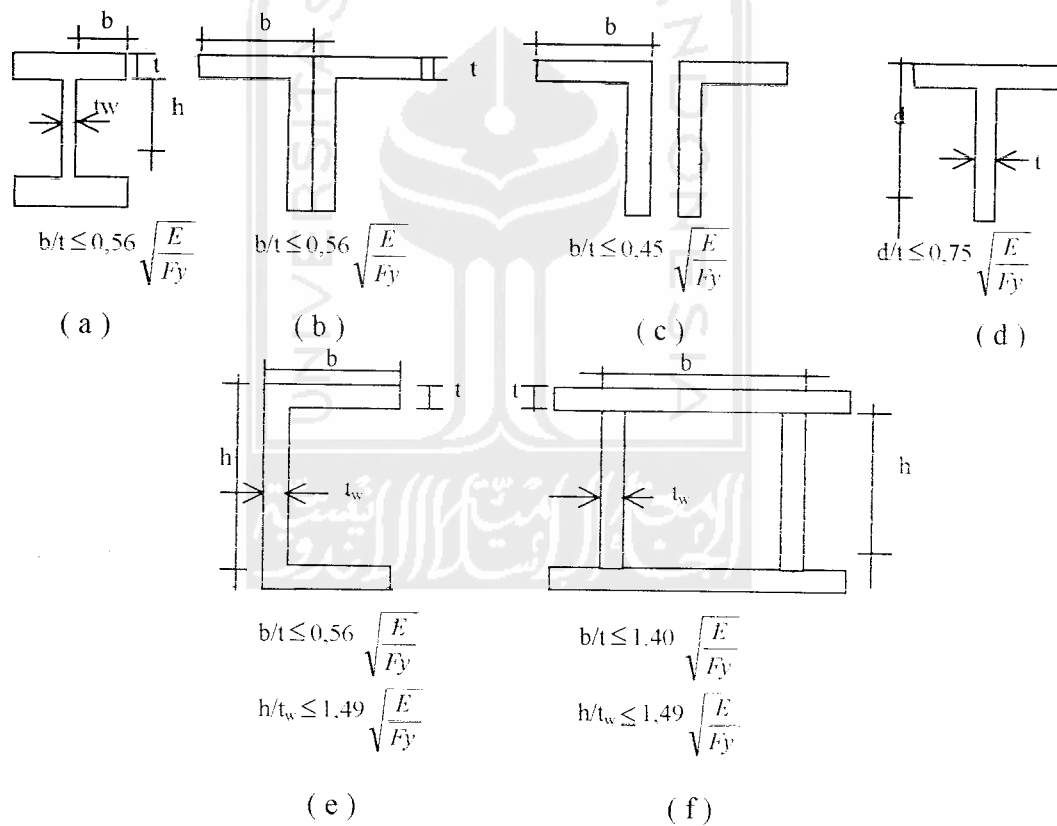
Berdasarkan teori diatas maka profil C dapat ditinjau nilai k , untuk sayap yang merupakan elemen tidak diperkuat nilai k akan mendekati 0,425 sedangkan

pada badan karena merupakan elemen yang diperkuat maka nilai k mendekati 4. Seperti pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Tampang Profil C

Tetapi ada perbedaan antara nilai k teoritis dengan nilai k hasil penelitian seperti yang dikemukakan R M Barker dan J A Pucket, 1997. Sebagai contoh nilai k pada sayap adalah 0,425 tetapi pada penelitian nilai k adalah 0,56.

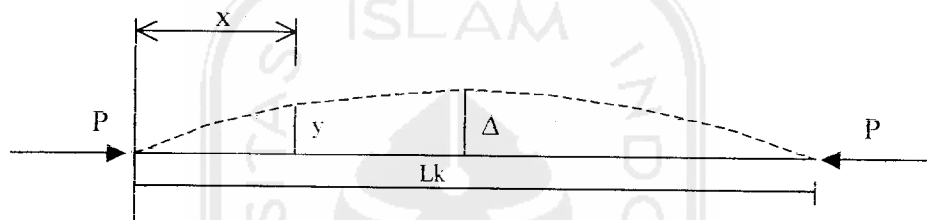


Gambar 3.5. Rasio tebal terhadap tebal berbagai penampang profil (R M Barker dan J A Pucket, 1997)

3.2.3. Tekuk Elastis Kolom Tunggal

Menurut persamaan Euler yang dikemukakan oleh Lambert Tall, 1974, beban kritis kolom diturunkan dari persamaan pelenturan sebuah batang lurus yang semua seratnya tetap elastis hingga tekuk terjadi tetapi tidak terjadi tekuk lokal, batang tersebut memiliki dukungan sederhana pada ujung-ujungnya dan diberi gaya aksial tekan sentris.

Persamaan garis elastis untuk kolom yang ujungnya sendi-sendii ditunjukkan dengan Persamaan (3.3) atau (3.4)



Gambar 3.6. Batang lurus dibebani gaya tekan aksial

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{P_{cr}}{EI} y \quad (3.3)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P_{cr}}{EI} y = 0 \quad (3.4)$$

dengan E = modulus elastis, I = inersia, P = gaya aksial, y = pelenturan,

bila diasumsikan $k^2 = P_{cr} / EI$ (3.5)

substitusi k^2 kedalam Persamaan (3.4) maka akan diperoleh:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = 0 \quad (3.6)$$

penyelesaian persamaan diferensial linear berordo dua ini dapat dinyatakan sebagai

$$y = A \sin kx + B \cos kx \quad (3.7)$$

untuk $x = 0$, nilai $y = 0$, maka $0 = A, 0+B$, diperoleh $B = 0$

untuk $x = L$, nilai $y = 0$, diperoleh: $0 = A \sin (k.L_k)$

untuk $\sin (k.L_k) = 0$, diperoleh:

$$k.L_k = N \pi \text{ atau } k = (N.\pi)/L_k$$

substitusi nilai $k = (N. \pi)/L_k$ ke Persamaan (3.5), maka:

$$P_{cr} = \frac{N^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} \quad (3.8)$$

Menurut Lambert Tall (1974), beban kritis adalah beban terkecil yang mampu mengakibatkan kolom tersebut dalam kondisi kritis. Kondisi dapat terjadi bila defleksi merupakan lendutan berkelengkungan tunggal (*single curvature*), sehingga nilai $N=1$. Dengan demikian, beban kritis Euler untuk kolom yang berujung sendi-sendi adalah:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} \quad (3.9)$$

dengan $L_k =$ panjang tekuk.

Bila masing-masing ruas Persaman (3.9) dibagi dengan luas penampang batang A , maka diperoleh:

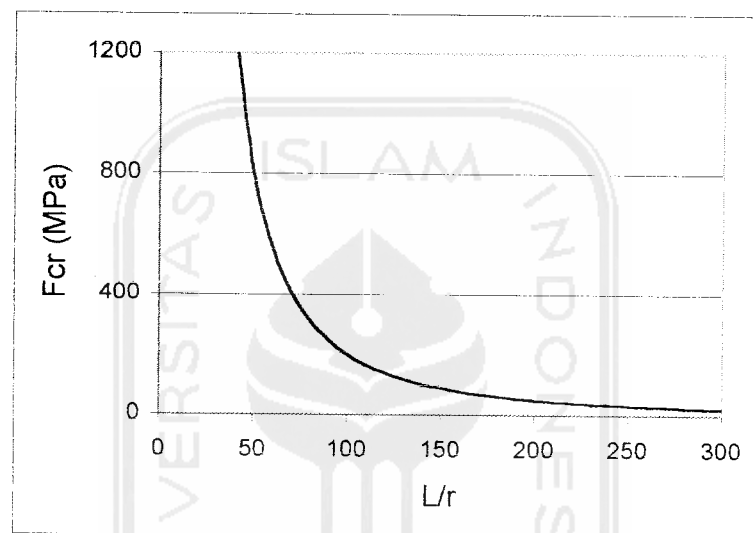
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{A \cdot L_k^2} \quad (3.10)$$

dimana, $I = A \cdot r^2$ atau $r^2 = I/A$, maka,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(L_k / r)^2} \quad (3.11)$$

dengan $r =$ jari-jari kelembaman.

Persamaan (3.11) diatas memperlihatkan dengan jelas kapasitas pikul beban suatu kolom selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang tekuk, sebanding dengan modulus elastis material dan momen inersia penampang. Semakin panjang kolom maka semakin kecil beban yang dapat menyebabkan kolom tersebut tertekuk, sebaliknya semakin pendek kolom maka semakin besar beban yang dapat menyebabkan kolom tersebut tertekuk.



Gambar 3.7 Grafik tegangan kritis Euler yang merupakan fungsi kelangsingan (L/r) (Lambert Tall, 1974)

3.2.4. Tekuk Inelastik

Untuk menentukan kekuatan kolom dasar, kondisi kolom perlu diidealisir dengan beberapa anggapan yaitu : (1) sifat tegangan-regangan tekan sama diseluruh titik pada penampang; (2) tidak ada tegangan internal seperti akibat pendinginan setelah pengilingan (rolling) dan akibat pengelasan; (3) kolom lurus sempurna dan prismatis; (4) resultante beban bekerja melalui sumbu pusat batang

sampai batang mulai melentur; (5) kondisi ujung harus statis tertentu sehingga panjang antar sendi-sendi ekuivalen dapat ditentukan; (6) teori lendutan yang kecil seperti pada lendutan yang umum berlaku dan gaya geser dapat diabaikan; serta (7) puntiran atau distorsi penampang lintang tidak terjadi selama melentur.

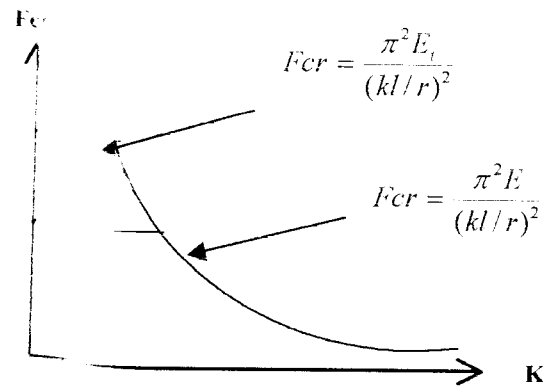
Dengan anggapan diatas maka kekuatan kolom dasar dinyatakan sebagai

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad 3.12$$

Dimana F_{cr} : tegangan rata-rata pada penampang; E_t : modulus tangen pada tegangan rata-rata penampang; KL/r : angka kelangsingan efektif (ujung sendi ekuivalen)

Batang tekan yang panjang akan runtuh akibat tekuk elastis, dan batang tekan pendek yang buntak dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan sampai daerah pengerasan regangan (*strain hardening*). Sedangkan pada keadaan yang umum kehancuran akibat tekuk terjadi setelah sebagian penampang lintang meleleh, keadaan ini disebut tekuk inelastik

Oleh karena kolom dengan panjang yang umum tertekuk pada saat sejumlah seratnya menjadi inelastik, maka modulus elastisitas ketika tertekuk lebih kecil dari harga awalnya. Sehingga ada perbedaan nilai E yang dikemukakan oleh Euler dan Engesser, Euler menggunakan nilai E pada saat elastis sedangkan Engesser menggunakan modulus tangen (E_t) dimana nilai E_t lebih kecil daripada nilai E . Seperti Gambar 3.6



Gambar 3.8 Grafik perbandingan modulus elastis dan modulus tangen

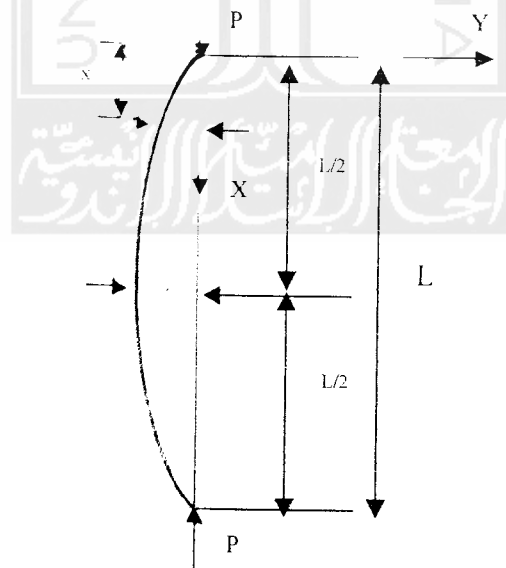
3.2.5. Momen-Kelengkungan (M- Φ)

Untuk mendapatkan persamaan kelengkungan pada kolom maka digunakan pendekatan persamaan diferensial kurva elastis batang yaitu

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad 3.13$$

Dari Gambar 3.9 maka persamaan 3.13 menjadi

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M = P(-x) \quad 3.14$$



Gambar 3.9 Kolom dibebani gaya aksial

Penyelesaian Persamaan 3.14 dengan menuliskan kembali dalam bentuk

$$EI \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = -Py \quad 3.15$$

Persamaan 3.15 dikalikan dengan 2 dy diperoleh diferensial sempurna, dengan integrasi :

$$EI \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = -Py^2 + C_1 \quad 3.16$$

Dari Gambar 3.9 diketahui $y = \delta$ bila $dy/dx = 0$, maka substitusikan harga tersebut dalam Persamaan 3.14 menghasilkan $C_1 = P\delta^2$, dan Persamaan 3.16 menjadi

$$EI \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = P(\delta^2 - y^2) \quad 3.17$$

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\frac{P}{EI}} \sqrt{\delta^2 - y^2} \quad 3.18$$

$$\frac{dy}{\sqrt{\delta^2 - y^2}} = \sqrt{\frac{P}{EI}} dx \quad 3.19$$

Dengan mengintegrasikan Persamaan 3.19 didapat

$$\sin^{-1} \frac{y}{\delta} = x \sqrt{\frac{P}{EI}} + C_2 \quad 3.20$$

Mengevaluasi C_2 dengan menggunakan hubungan $y = 0$ pada $x = 0$ didapat nilai

$C_2 = 0$, sehingga persamaan kelengkungan kolom dalam keadaan elastis adalah

$$y = \delta \sin \left(x \sqrt{\frac{P}{EI}} \right) \quad 3.21$$

3.2.5. Hubungan Antara Tekuk Lokal dan Tekuk Lentur

Tekuk lokal dan tekuk lentur dapat terjadi secara bersamaan apabila tegangan kritis pelat sama dengan tegangan kritis kolom keseluruhan, seperti pada Persamaan 3.22

$$F_{cr \text{ pelat}} = F_{cr \text{ keseluruhan}} \quad (3.22)$$

Seperti pada Persamaan 3.3 maka

$$F_{cr \text{ pelat}} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.23)$$

Sehingga

$$(KL/r) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_{cr \text{ pelat}}}} \quad (3.24)$$

dengan memasukkan Persamaan 3.2 kedalam Persamaan 3.24, maka

$$(KL/r) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2}}} \quad (3.25)$$

$$KL/r = (b/t) \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \quad (3.26)$$

Dengan μ baja 0,3, sehingga

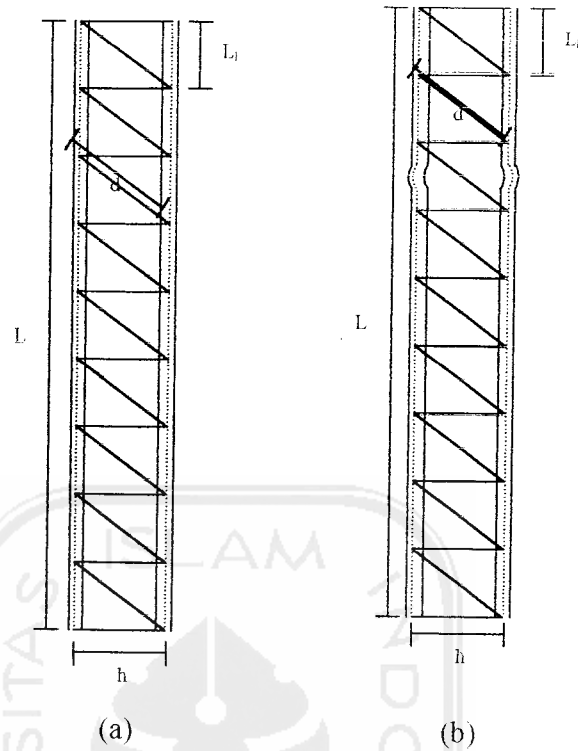
$$KL/r = \frac{3,3045(b/t)}{\sqrt{k}} \quad (3.27)$$

Dari Persamaan 3.22 sampai Persamaan 3.27 dapat diambil kesimpulan bahwa pada profil baja yang sama apabila semakin panjang batang tersebut maka KL/r akan semakin besar sehingga $F_{cr \text{ keseluruhan}}$ akan semakin kecil bahkan bisa lebih kecil dari $F_{cr \text{ pelat}}$, sehingga keruntuhan kolom diakibatkan oleh tekuk keseluruhan

kolom. Sebaliknya, pada profil baja yang sama apabila semakin pendek batang tersebut maka KL/r akan semakin kecil sehingga $F_{cr\text{ keseluruhan}}$ akan semakin besar bahkan bisa lebih besar dari $F_{cr\text{ pelat}}$, sehingga keruntuhan kolom diakibatkan oleh tekuk lokal kolom.

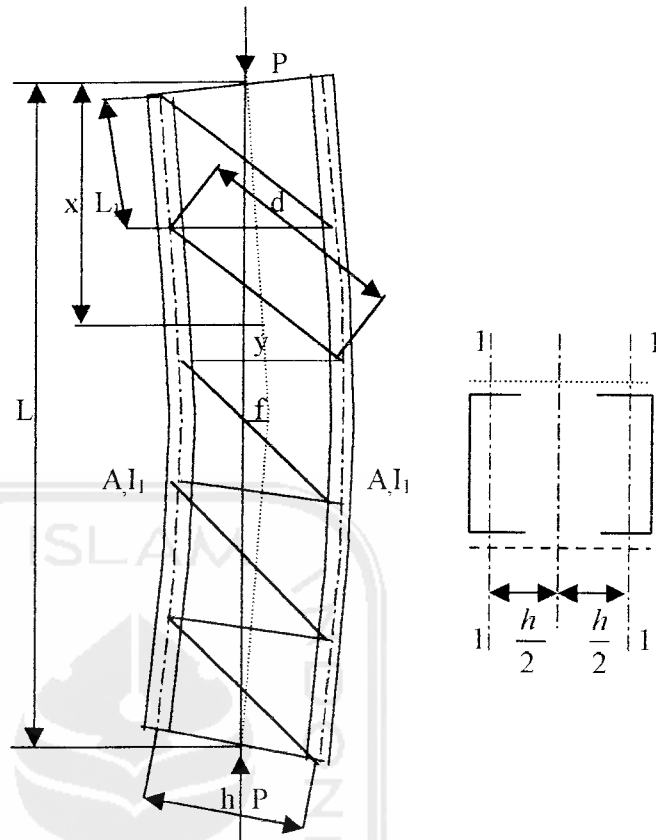
3.4. Pengaruh Gaya Geser Pada Kolom Tersusun

Penyambungan antara batang-batang tersusun dengan memakai batang ikat/diagonal (lacing) bermanfaat agar semua komponen bekerja sebagai satu kesatuan. Komponen geser dari beban aksial timbul ketika batang tekan melentur. Besarnya pengaruh geser terhadap pengurangan kekuatan kolom sebanding dengan besarnya deformasi yang ditimbulkan oleh gaya geser. Penampang berbadan pejal (*solid – webbed*) seperti profil *w* memiliki deformasi geser yang lebih kecil daripada kolom tersusun yang menggunakan batang ikat dan/ atau plat kopel (*batten plates*)



Gambar 3.10 a) Kolom tersusun, b) Kolom tersusun yang mengalami tekuk lokal batang tunggal

Gambar 3.7a menunjukkan kolom tersusun sebelum mengalami deformasi dan Gambar 3.7b menunjukkan kolom tersusun yang mengalami tekuk lokal batang tunggal sedangkan Gambar 3.8 menunjukkan kolom tersusun yang dibebani gaya aksial serta mengalami tekuk keseluruhan.



Gambar 3.11. Kolom tersusun yang dibebani gaya aksial
(Friedrich Bleich, 1952)

Persamaan untuk E.nergi Tegangan (V) adalah :

$$V = \frac{1}{2} \left(2 \sum \frac{P^2 c}{EA} + \sum \frac{D^2 d}{EA_d} + \sum \frac{B^2 h}{EA_b} \right) \quad (3.28)$$

Dimana kondisi pertama adalah akumulasi energi elastik sedangkan 2 kondisi terakhir adalah energi dari batang perangkat.

Momen pada semua titik pada as kolom adalah :

$$M_x = P c.y = P_c f \sin \frac{\pi x}{l}$$

Dengan tegangan geser :

$$Q_x = \frac{dM_z}{dx} = P_c f \frac{\pi x}{l}$$

Sehingga :

$$F = \frac{dM_z}{z dx} = \pm P_c f \frac{f}{h} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.29a)$$

$$D = Q_x \frac{d}{h} = \pm P_c f \frac{d}{h} \frac{\pi}{l} \cos \frac{\pi x}{l} \quad (3.29b)$$

$$B = Q_x = \pm P_c f \frac{\pi}{l} \cos \frac{\pi x}{l} \quad (3.29c)$$

Dengan anggapan $\frac{\pi x}{l} = \frac{2r-1}{2n} \pi$, dimana $r = 1, 2, 3, \dots, n-1$ dan n adalah jumlah dari titik bidang, sehingga :

$$V = \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{h^2} \frac{2}{EA} \sum_{r=1}^n \sin^2 \frac{2r-1}{2n} \pi + \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{d^3}{h^2} \frac{\pi^2}{l^2} \frac{l}{EA_d} \sum_{r=1}^n \cos^2 \frac{2r-1}{2n} \pi$$

$$+ \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{\pi^2}{l^2} \frac{h}{EA_b} \sum_{r=1}^n \cos^2 \frac{2r-1}{n} \pi$$

Momen Inesia $I_0 = Ah^2/2$, maka :

$$\frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{h^2} \frac{2}{EA} = \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{EI_0}$$

dan

$$\sum_{r=1}^n \sin^2 \frac{2r-1}{2n} \pi = \sum_{r=1}^n \cos^2 \frac{2r-1}{2n} \pi = \frac{n}{2} = \frac{1}{2c} \quad (3.30)$$

Sehingga bentuk persamaan Energi Tegangan adalah :

$$V = P_c^2 \frac{f^2 l}{4} \left(\frac{1}{EI_0} + \frac{d^2 \pi^2}{ch^2 l^2} \frac{1}{EA_d} + \frac{h \pi^2}{c l^2} \frac{1}{EA_b} \right) \quad (3.31)$$

Persamaan Gaya Luar (W)

$$W = P_c \Delta l = \frac{P_c}{2} \int_0^l y'^2 dx$$

Dengan $y' = (\pi/l) f \cos(\pi x/l)$, setelah di integralkan didapat :

$$W = P_c \frac{\pi^2 f^2}{4l} \quad (3.32)$$

Substitusi V dan W dari persamaan 3.31 dan 3.32

$$\frac{\pi^2}{l} - P_c l \left(\frac{1}{E_l I_0} + \frac{\pi^2 d^3}{l^2 ch^2} \frac{1}{EA_d} + \frac{\pi^2 h}{l^2 c} \frac{1}{EA_b} \right) = 0$$

Sehingga Persamaan Tegangan kritis adalah :

$$P_c = \frac{\pi^2 E I_0}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E I_0}{l^2} \frac{1}{E c h^2} \left(\frac{d^3}{A_d} + \frac{h^3}{A_b} \right)} \quad (3.33)$$

Jika perangkai sangat kaku, $A_d = A_b = \infty$, Persamaan 3.33 akan menjadi tegangan kritis $\pi^2 E I_0 / l^2$ dimana tegangan kritis kolom tersusun tersebut mempunyai momen inersia $I_0 = A h^2 / 2$. Momen sebenarnya dari penampang kolom adalah :

$$I = I_0 + 2I_1 \quad (3.34)$$

Dengan substitusikan I pada I_0 pada persamaan 3.33 didapat **Persamaan Tegangan Kritis Kolom Tersusun** yaitu :

$$P_c = \frac{\pi^2 E I}{(kl)^2} \quad (3.35)$$

dengan :

$$k = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E I_0}{l^2} \frac{1}{E c h^2} \left(\frac{d^3}{A_d} + \frac{h^2}{A_b} \right)} \quad (3.36)$$

dimana E : Modulus elastisitas kolom, l : panjang kolom, l_1 : panjang elemen batang yang dibatasi oleh ujung-ujung batang penghubung, d : panjang batang diagonal, h : panjang batang horisontal, A_d : luas penampang satu batang diagonal, A_b : luas penampang satu batang horisontal.

Dari persamaan 3.36 dapat kita lihat bahwa semakin panjang batang perangkai diagonal (d) akan semakin besar nilai k , dengan semakin besar nilai k maka beban kritis (P_c) semakin kecil. Pada penelitian ini dibuat variasi pada jarak

perangkai (l_1), sehingga semakin besar jarak perangkai (l_1) maka nilai k semakin kecil yang akan mengakibatkan beban kritis (P_c) semakin besar.

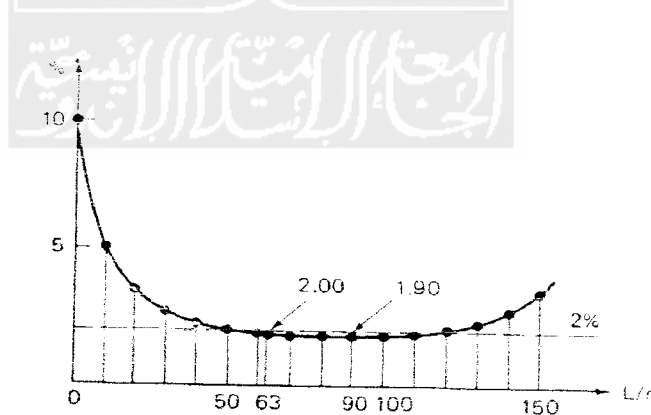
Dengan mengganti $\pi^2 E I_0 / l^2$ menjadi $2A \sigma_c$ persamaan 3.36 menjadi :

$$k = \sqrt{1 + \frac{2A \sigma_c}{A_d E} \frac{1}{\sin^2 \alpha \cos \alpha} + \frac{2A \sigma_c}{A_b E} \frac{1}{\cos \alpha}} \quad (3.37)$$

Dari persamaan 3.37 dapat dilihat perbedaan nilai k bila sudut berbeda seperti tabel 3.2, dengan ratio $2A/Ad = 2A/Ab$ maka :

Stress, σ_c , MPa	α , derajat	Rasio 2A/Ad				
		30	25	20	15	10
220	30	1.091	1.076	1.062	1.047	1.031
	45	1.068	1.057	1.046	1.034	1.023
	60	1.059	1.050	1.039	1.027	1.018
172	30	1.072	1.060	1.049	1.037	1.024
	45	1.053	1.045	1.036	1.027	1.018
	60	1.046	1.038	1.029	1.018	1.011

Besar gaya geser yang terjadi pada kolom yang disyaratkan oleh AASHTO adalah sebesar 2% dari gaya aksial yang diterima oleh kolom, hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Gaya geser ideal (*Kuzmanovic and Willems, 1977*)

Pada Gambar 3.12 dapat dilihat bahwa besarnya gaya geser yang terjadi pada kolom untuk kelangsingan 50 sampai dengan 110 berkisar 2 % dari beban aksial yang diterima oleh kolom, untuk kelangsingan kolom kecil maka gaya geser mendekati 10 % dari beban aksial yang diterima kolom dan akan membesar kembali jika kelangsingan kolom besar. (*Kuzmanovic and Willems, 1977*)

3.4. Hipotesis

Pada kolom tersusun dengan perangkai transversal dan diagonal yang jarak perangkai (l_1) bervariasi akan mempengaruhi beban kritis. Jarak perangkai yang semakin besar menjadikan beban kritis yang besar dan akan mengakibatkan tegangan kritis yang besar. Tegangan kritis lebih besar dari tegangan kritis plat akan mengakibatkan tekuk lokal dan jika tegangan kritis lebih besar dari tegangan keseluruhan akan terjadi tekuk keseluruhan (*over all buckling*)