BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Kolom

Kolom merupakan batang desak karena beban yang bekerja adalah aksial desak sepanjang sumbu bahan. Kolom merupakan elemen struktur yang harus direncanakan dan dihitung secara cermat mengenai kekuatan terhadap beban yang bekerja karena elemen struktur ini berhubungan erat dengan kestabilan bangunan.

Ada beberapa hal yang menyebabkan kehancuran pada kolom sebagai elemen struktur bangunan, diantaranya adalah sifat kolom yang mengalami tekuk elastis atau tekuk inelastis maupun kondisi pembebanan yang terjadi. Sifat kolom yang mengalami suatu tekuk tertentu dipengaruhi oleh angka kelangsingan (*slenderness ratio*). Sedangkan kondisi pembebanan pada kolom adalah konsentris dan eksentris.

Kolom suatu bangunan gedung selalu menyatu dengan elemen struktur yang lain yaitu balok dan pelat. Anggapan bahwa kolom ideal yang mengasumsikan terjadinya beban secara konsentris tidak dapat terpenuhi. Berdasarkan kondisi pembebanan yang terjadi pada kolom dan kondisi kolom yang mengalami suatu tekuk tertentu perlu diadakan studi untuk memahami kedua kondisi tersebut.

Pada keadaan yang umum, ada tiga kategori kolom yaitu kolom panjang, kolom sedang dan kolom pendek. Tiap kategori kolom memiliki perilaku yang berbeda-beda, yaitu perilaku kolom ketika beban bekerja terhadapnya.

Leonard Euler adalah orang pertama yang memformulasikan ekspresi beban tekuk kritis pada kolom. Beban kritis tekuk untuk kolom yang ujung-ujungnya sendi, yang disebut sebagai beban tekuk Euler adalah :

$$Pcr = \frac{\pi^2.E.I}{L^2} \quad \text{...}(2.1)$$

Di mana :

E = modulus elastisitas

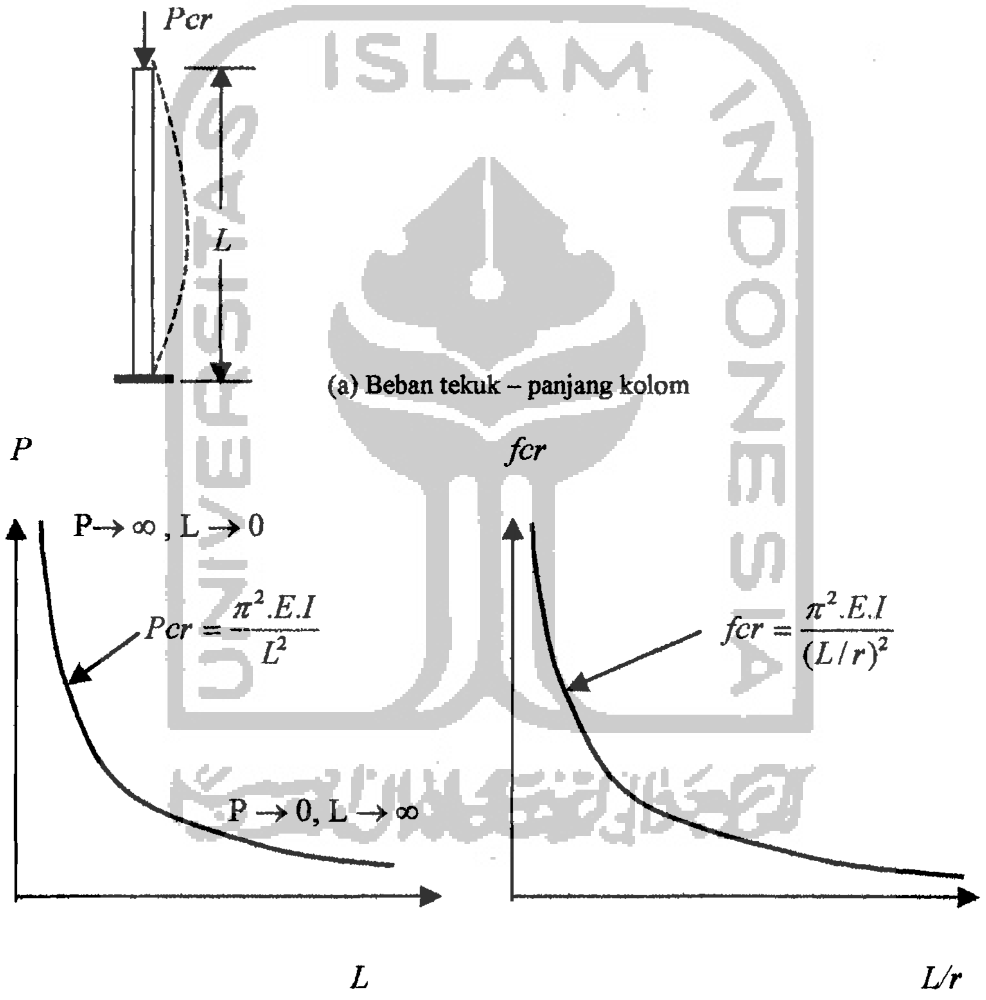
I = momen inersia

L = panjang kolom di antara kedua ujung sendi

π = konstanta pi = 3,1416

Persamaan di atas memperlihatkan dengan jelas bahwa kapasitas pikul beban suatu kolom selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen, sebanding dengan modulus elastisitas material, dan sebanding dengan momen inersia penampang melintang. Momen inersia yang dimaksud adalah yang minimum terhadap sumbu berat penampang apabila kolom tersebut tidak dikekang secara khusus.

Dengan menggunakan persamaan tekuk Euler kita dapat memprediksi bahwa apabila suatu kolom menjadi sangat panjang, beban yang dapat menimbulkan tekuk pada kolom menjadi semakin kecil menuju nol. Sebaliknya, apabila panjang kolom semakin menuju nol, maka beban yang diperlukan untuk menyebabkan kolom itu menekuk semakin besar. Apa yang sebenarnya terjadi, tentu saja apabila kolom semakin pendek, ragam kegagalan yang akan terjadi bukanlah tekuk, melainkan hancurnya material. Dengan demikian, persamaan Euler tidak berlaku lagi untuk kolom pendek. Pada kolom pendek ini yang lebih menentukan adalah tegangan hancur material.



(a) Beban tekuk – panjang kolom

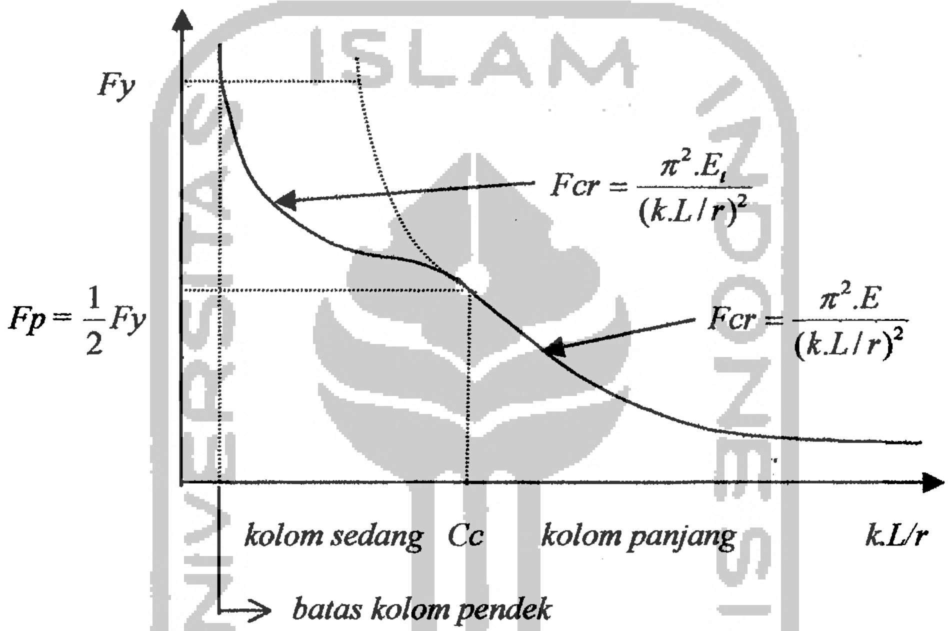
(b) Beban tekuk Euler untuk kolom panjang (c) Tegangan tekuk kritis – angka kelangsingan

Gambar 2.1. Tekuk Euler pada kolom panjang.

Sumber : Struktur

Untuk kolom sedang, elastisitas pada persamaan Euler tidak berlaku lagi, sehingga digunakan modulus elastisitas tangen. Gambar di atas adalah Gambar 2.1 yang menunjukkan tekuk Euler pada kolom panjang.

Sedangkan berikut ini adalah Gambar 2.2 yang menunjukkan batas keadaan kolom sedang dan kolom panjang.



Gambar 2.2. Batas keadaan kolom sedang dan kolom panjang.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

2.2. Tekuk Inelastis

Kondisi inelastis suatu bahan adalah merupakan kondisi ragam kegagalan yang terjadi pada kolom baja pada saat sebagian dari serat profil mengalami tegangan leleh.

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*). Pada keadaan yang umum, kehancuran akibat tekuk terjadi setelah sebagian penampang lintang meleleh, keadaan ini disebut *tekuk inelastis*.

Tekuk inelastis adalah ragam kegagalan yang terjadi pada kolom baja. Kondisi tekuk inelastis ini adalah kondisi dimana angka kelangsingan kolom baja sebagai suatu elemen struktur yang ditinjau ($k.l/r$) adalah lebih kecil jika dibandingkan dengan angka kelangsingan kritisnya (Cc) yang dihitung dengan rumus :

$k.l/r < Cc$ (American Institute of Steel Construction, 1980)

Dimana, k = Kondisi tumpuan kolom

l = Panjang elemen struktur kolom

r = *Radius of Gyration* profil kolom

$$Cc = \sqrt{\frac{2.\pi^2.E}{Fy}} \quad \text{...(2.2)}$$

didapat dari :

$$F_{cr} = \frac{Pcr}{A}, \text{ atau} \quad \text{...(2.3)}$$

$$Fcr = \frac{\pi^2.E}{[k.l/r]^2} \Rightarrow \left[\frac{k.l}{r}\right]^2 = \frac{\pi^2.E}{Fcr} \quad \text{...(2.4)}$$

Tegangan kritis maksimum untuk batang elastis adalah 50 % dari tegangan leleh.

$$Fcr = 50\,\%.Fy \Rightarrow Fcr = 0{,}5.Fy \quad \text{..(2.5)}$$

$$\left[\frac{k.l}{r}\right]^2 = \frac{\pi^2.E}{0{,}5.Fy} \quad \text{...(2.6)}$$

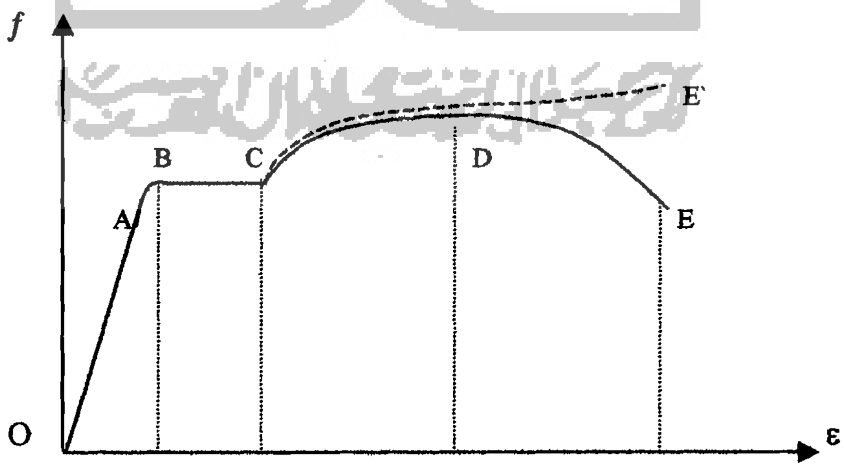
$$\frac{k.l}{r} = \sqrt{\frac{2.\pi^2.E}{Fy}} \quad \ldots\ldots(2.7)$$

$\frac{k.l}{r} = Cc =$ kelangsingan kritis.

2.2.1. Hubungan tegangan-regangan

Suatu batang yang terbuat dari logam apabila bekerja oleh gaya aksial tertentu pada kondisi temperatur ruang, akan mengalami perubahan bentuk. Hubungan yang menggambarkan perilaku bahan berupa hubungan tegangan-regangan dalam bentuk diagram tegangan-regangan. Diagram tegangan-regangan linier pada daerah elastis dan diikuti kurva non linier pada daerah non-elastis.

Diagram tegangan-regangan menunjukkan terdapat dua fungsi yang berbeda. Pertama adalah fungsi yang bekerja di bawah batas tegangan leleh dan fungsi yang bekerja di atas batas tegangan leleh. Hal ini disebabkan karena pada kondisi di bawah batas tegangan leleh perilaku bahan mengikuti hukum Hooke.



Gambar 2.3. Hubungan tegangan-regangan.

Sumber : Pengetahuan Dasar Struktur Baja.

Tetapi setelah melewati batas tegangan leleh, bahan akan bersifat inelastis. Hubungan tegangan-regangan ditunjukkan pada Gambar 2.3 di atas.

Pada diagram tegangan-regangan normal tipikal di atas tampak bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada OA adalah linear, sedangkan di atas A diagram tidak linear lagi, sehingga titik A disebut sebagai batas sebanding (*proportional limit*). Tegangan yang terjadi pada titik A ini disebut tegangan batas sebanding, *Fp*. Sedikit di atas A terdapat titik batas elastis bahan. Hal ini berarti bahwa batang yang dibebani sedemikian rupa sehingga tegangan yang timbul tidak melampaui tegangan elastis, panjangnya akan kembali ke panjang semula jika beban dihilangkan. Pada umumnya tegangan batas sebanding dan tegangan elastis relatif cukup dekat, sehingga seringkali kedua tegangan tersebut dianggap sama, yaitu sebesar tegangan elastis. Regangan (ε) yang timbul pada saat bahan putus, pada umumnya berkisar antara 150 sampai 200 kali regangan elastis. Di atas tegangan elastis, pada titik B baja mulai leleh. Tegangan di titik B ini disebut sebagai tegangan leleh. Pada saat leleh ini baja masih mempunyai kekuatan. Hal ini berarti bahwa pada saat leleh baja masih mampu menghasilkan gaya perlawanan. Bentuk kurva pada bagian leleh ini, mula-mula mendekati datar, berarti tidak ada tambahan tegangan, sekalipun regangan bertambah. Hal ini berakhir pada saat mulai terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*) di titik C, kurva naik ke atas lagi sampai dicapai kuat tarik (*tensile strength*) di titik D. Setelah itu, kurva turun dan bahan akan retak (*fracture*) di titik E. Diagram tegangan-regangan ini beranggapan bahwa luas tampang bahan tidak mengalami perubahan selama pembebanan. Menurut hukum Hooke, suatu batang yang dibebani secara aksial luas tampangnya akan berubah. Sebelum titik C perubahan luas tampang itu cukup kecil sehingga pengaruhnya dapat diabaikan. Tetapi setelah pada fase pengerasan regangan hukum Hooke tidak berlaku lagi.

Fungsi pertama yang bekerja di bawah batas tegangan leleh adalah $Fp = E \cdot \varepsilon p$. Untuk fungsi yang bekerja di atas batas tegangan leleh di mana bahan bersifat inelastis, maka fungsi tersebut tidak berlaku.

2.2.2. Hubungan tegangan-angka kelangsingan

Angka kelangsingan merupakan faktor yang sangat mempengaruhi ragam kegagalan yang terjadi pada kolom. Kolom dengan angka kelangsingan kecil akan mengalami ragam kegagalan berupa kehancuran material sedangkan kolom dengan angka kelangsingan besar akan mengalami ragam kegagalan berupa tekuk.

Semua kolom memiliki lengkungan awal dan eksentrisitas yang tak terduga, maka faktor keamanan harus memperhitungkan kondisi ini. Untuk kolom pendek dengan eksentrisitas beban dan tegangan residu yang dapat diabaikan, faktor keamanan tidak perlu lebih besar dari yang ditetapkan untuk batang tarik, yaitu sebesar 1,67 menurut Spesifikasi AISC. Semakin besar angka kelangsingan, semakin tinggilah pengaruh eksentrisitas tak terduga, bengkokan awal, dan faktor panjang efektif k akibat kondisi ujung. Atas dasar ini, AISC menetapkan FS yang meningkat sesuai dengan angka kelangsingan sampai maksimum sebesar 15 % di atas harga dasar, dengan kata lain faktor maksimum 1,92. Untuk mendapatkan transisi yang berangsur-angsur dari FS = 1,67 bagi $k.l/r = 0$ ke FS = 1,92 bagi $k.l/r = Cc$, persamaan FS tersebut dapat dihitung dengan rumus :

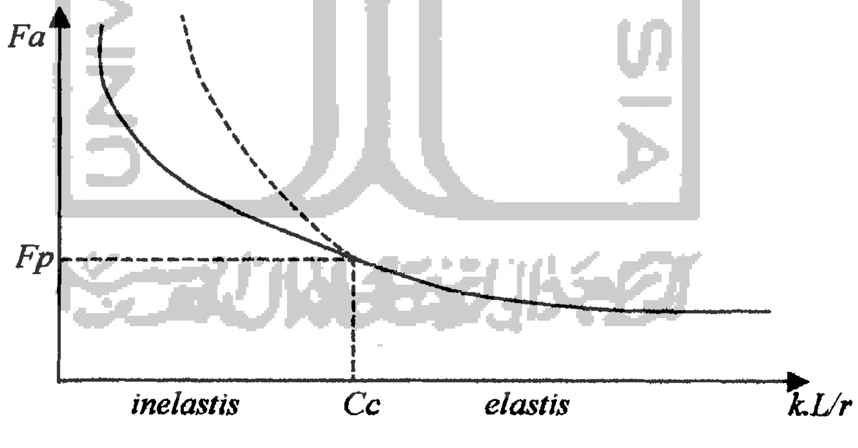
$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8}\frac{[k.l/r]}{Cc} - \frac{1}{8}\frac{[k.l/r]^3}{[Cc]^3} \quad \text{.......(2.8)}$$

Hubungan tegangan dengan angka kelangsingan akan menunjukkan perilaku bahan di mana terjadinya kondisi tekuk elastis dan inelastis.

Untuk batang desak tekuk tidak elastis (inelastis), maka tegangan ijin yang terjadi adalah :

$$Fa = \frac{\left[1 - \frac{(k.l/r)^2}{2.Cc^2}\right]}{FS}.Fy < 0{,}6.Fy \quad \text{.......(2.9)}$$

Grafik di bawah memperlihatkan hubungan antara tegangan (F) dan angka kelangsingan ($k.l/r$).



Gambar 2.4. Grafik hubungan tegangan-angka kelangsingan.
Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Pada saat angka kelangsingan sama dengan angka kelangsingan kritis, $(k.l/r) = (Cc)$, maka $Fa = Fp = 0{,}5.Fy$ atau disebut dengan batas antara kondisi elastis dengan kondisi inelastis.

Dari Gambar 2.4. dapat dilihat bahwa tekuk inelastis terjadi pada kolom dengan angka kelangsingan kecil dimana tegangan yang terjadi akan melampaui batas proporsional bahan sebelum mencapai harga tegangan pada kurva Euler, yaitu sebelum mencapai tegangan leleh (*Fy*) bahan.

2.3. Kekuatan Kolom Baja

Kekuatan kolom baja dipengaruhi oleh sifat bahan, sifat kolom ataupun yang berhubungan dengan perilaku pembebanan terhadap kolom.

2.3.1. Tegangan residu

Tegangan residu adalah tegangan yang tetap berada pada profil setelah dibentuk menjadi produk akhir. Tegangan residu diakibatkan karena terjadinya deformasi plastis, yang pada profil baja tegangan residu dapat disebabkan oleh :

1. Pendinginan yang tidak bersamaan pada semua bagian profil yang dibentuk dengan penggilingan panas.
2. Lenturan atau lendutan dingan selama fabrikasi.
3. Proses pelubangan dan pemotongan selama fabrikasi.
4. Pengelasan selama pelaksanaan.

Dari beberapa penyebab terjadinya tegangan residu diberikan suatu persamaan pendapat bahwa secara umum tegangan residu ditimbulkan karena pendinginan yang tidak bersamaan pada semua bagian penampang profil. Pada profil bersayap lebar (*wide flange*) atau profil H yang digiling panas, sayap merupakan bagian yang lebih tebal dari pada badan sehingga akan mengalami pendinginan yang lebih lambat. Bagian ujung sayap yang lebih terbuka terhadap udara akan mengalami pendinginan lebih cepat dari pada bagian tengah.

Tegangan residu ini akan mempengaruhi batas tegangan proporsional dari kolom dan akan mempengaruhi kekuatan kolom tersebut. Pada saat tegangan leleh penampang kolom baja tercapai, maka tegangan proporsional dari kolom adalah menjadi :

$$Fp = Fy - Fr \quad \text{..} \quad (2.10)$$

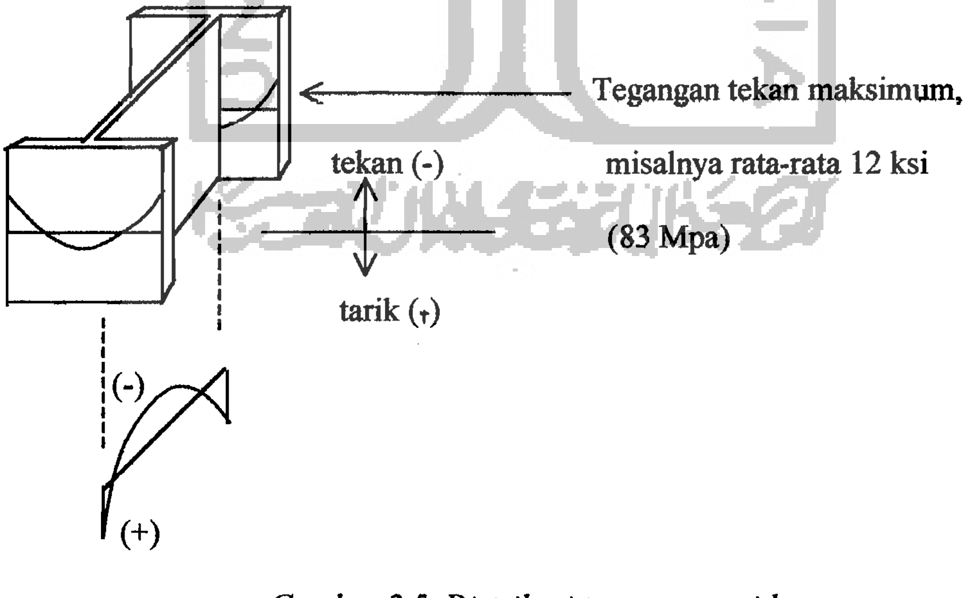
Di mana :

Fp = tegangan proporsional

Fy = tegangan leleh

Fr = tegangan residu

Tegangan residu di atas adalah tegangan residu maksimum pada penampang.



Gambar 2.5. Distribusi tegangan residu.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Tegangan residu yang terdapat pada profil didistribusikan secara parabolik seperti pada Gambar 2.5 di atas.

2.3.2. Kurva kolom

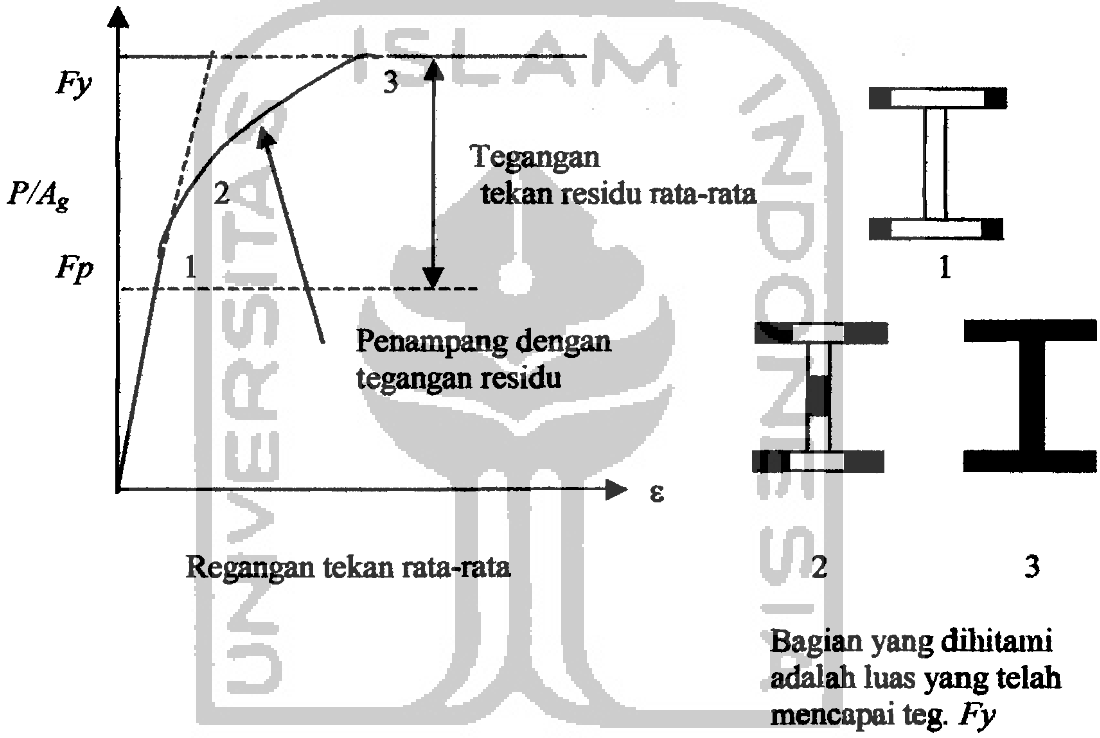
Dalam kondisi tekuk inelastis nilai modulus elastisitas (E) pada kondisi elastis yang konstan tidak dapat digunakan sehingga harus digunakan modulus tangen (E_t) yang mempunyai nilai berubah-ubah menurut fungsi variabel dari kurva tegangan-regangan. Untuk menggambarkan tegangan pada kolom inelastis adalah dengan menggunakan kurva kolom yang menggambarkan hubungan tegangan dengan faktor kelangsingan kolom. Dalam menggambarkan kurva kolom diperlukan nilai modulus tangen (E_t) dan tegangan kritis (Fcr) yang dinyatakan dalam bentuk tabel. Dari setiap harga E_t dan Fcr pada tabel dihitung besarnya nilai :

$$\pi\sqrt{\frac{E_t}{Fcr}} = \frac{k.l}{r} \quad \text{...(2.11)}$$

Hubungan nilai-nilai dari tegangan dengan nilai kelangsingan *k.l/r* digambarkan pada grafik. Nilai modulus tangen (E_t) diperoleh dari grafik hubungan antara modulus tangen (E_t) dengan tegangan-regangan.

2.3.3. Kurva kekuatan dasar dari SSRC

Kurva kekuatan kolom dasar SSRC (***Structural Stability Research Council***) digunakan untuk mengetahui batas di mana terjadinya tekuk elastis dan inelastis. Tegangan residu tekan terjadi pada ujung sayap dan tegangan residu tarik terjadi pada daerah pertemuan sayap dan badan. Besar tegangan residu maksimum adalah 0,3. Fy yang akan mempengaruhi terjadinya leleh pada bagian serat tertentu pada profil pada saat terjadi tegangan yang besarnya melampaui batas proporsional. Kurva yang menggambarkan pengaruh tegangan residu terhadap terjadinya leleh pada suatu penampang profil dapat terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Pengaruh tegangan residu pada kurva tegangan-regangan rata-rata
Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Pengaruh tegangan residu akan mempengaruhi harga modulus tangan E_t. Apabila luas daerah penampang yang belum mencapai tegangan leleh adalah A_e, maka nilai modulus tangen E_t adalah :

$$E_t = \frac{dFy}{d\varepsilon} = \frac{d\dfrac{P}{A}}{d\dfrac{P}{A_e.E}} = \frac{E.A_e}{A} \quad \text{...(2.12)}$$

Pada saat penampang kolom mulai leleh, maka beban yang dicapai adalah sebagai berikut :

$$P = (A - A_e).Fy + \int_{Ae} . F\, dA$$

Atau :

$$Fcr = \frac{P}{A} = \frac{A - A_e}{A}.Fy + \frac{1}{A}\int_{Ae} . \mathrm{F\ dA} \quad \text{..................................(2.13)}$$

Dari persamaan di atas terlihat jelas bahwa besarnya tegangan kritis yang terjadi tergantung pada fungsi dari distribusi tegangan residu yang terdapat pada penampang kolom. Apabila tidak terjadi regangan balik, maka momen tahanan dalam hanya dihasilkan oleh bagian yang elastis. Berdasarkan kondisi tersebut, maka beban kritis yang terjadi pada bagian penampang yang tidak elastis identik dengan beban Euler, hanya nilai inersia penampang (I) harus diganti dengan nilai I_e (inersia penampang efektif), menjadi :

$$Pcr = \frac{\pi^2.E.I_e}{(k.l)^2} \quad \text{...(2.14)}$$

atau :

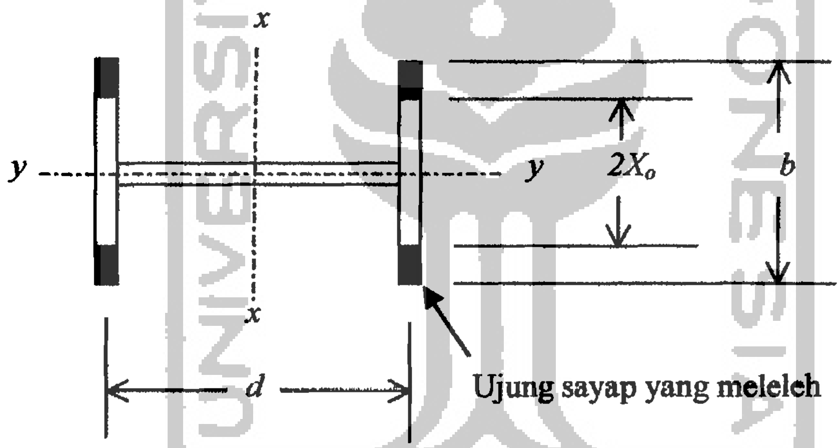
$$Fcr = \frac{\pi^2.E.I_e}{A.(k.l)^2} = \frac{\pi^2.E}{(k.l/r)^2} * \frac{I_e}{I} \quad \text{...(2.15)}$$

$$= \frac{\pi^2.E}{(k.l/r)^2} * f(\eta) \quad \text{...(2.16)}$$

Harga dari $\frac{I_e}{I}$ pada persamaan di atas merupakan suatu fungsi yang dapat digunakan untuk menghitung beban yang dapat didukung oleh kolom yang mengandung tegangan residu terhadap perilaku tekuk arah sumbu kuat (x-x) dan sumbu lemah *(y-y)*.

Kasus A. Tekuk terhadap sumbu lemah

Anggapan yang logis ialah bagian sayap menjadi plastis penuh sebelum bagian badan meleleh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Bagian penampang yang telah meleleh.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Misalkanlah k = proporsi bagian sayap yang tetap elastis

$$= \frac{2X_0}{b} = \frac{A_e}{A_f}$$

Jika badan diabaikan dalam menghitung I, maka persamaannya adalah :

$$E\frac{I_e}{I} = E\frac{t_f(2X_0)^3}{12}\left(\frac{12}{t_f b^3}\right) = Ek^3 \quad \text{..(2.17)}$$

Dengan menggunakan definisi modulus tangen :

$$E_t = \frac{\textit{Pertambahan tegangan nominal}}{\textit{Pertambangan regangan elastis}}$$

$$= \frac{dP / A}{\frac{dP / Ae}{E}} = \frac{Ae.E}{A} \quad \text{..(2.18)}$$

$$E_t.\ A = A_e.E$$

$$= E.(A_w + 2k.A_f) \quad \text{..(2.19)}$$

Keterangan :

A_w = luas badan

A_f = luas bruto pada satu sayap

A = luas bruto penampang total

Penyelesaian persamaan (2.19) untuk *k* dan substitusi persamaan (2.17) ke persamaan (2.1) menghasilkan :

$$k = \frac{E_t.A}{2.E.A_f} - \frac{A_w}{2.A_f} \quad \text{..(2.20)}$$

$$Fcr = \frac{\pi^2 E.k^3}{(k.l / r)^2} = \frac{\pi^2 E}{(k.l / r)^2}\left[\frac{A.E_t}{2A_f.E} - \frac{A_w}{2A_f}\right]^3 \quad \text{..........................(2.21)}$$

yang mencakup pengaruh badan yang elastis untuk tekuk terhadap sumbu lemah *(y-y)*.

Kasus B. Tekuk terhadap sumbu kuat

Bila badan dianggap elastis dan sumbangannya pada momen inersia diabaikan, maka secara pendekatan :

$$E\frac{I_e}{I} \approx E\frac{2.A_e.(d/2)^2}{2A_f.(d/2)^2} = Ek \qquad (2.22)$$

Jika badan yang elastis disetarakan, maka :

$$E\frac{I_e}{I} = E\left[\frac{2kA_f(d^2/4)+t_w d^3/12}{2A_f(d^2/4)+t_w d^3/12}\right] \qquad (2.23)$$

$$= E\left[\frac{2kA_f + A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right] \qquad (2.24)$$

Dengan memakai definisi modulus tangen dan persamaan (2.19),

$$2kA_f = \frac{E_t A}{E} - A_w \qquad (2.25)$$

Eliminasi suku *2kAf* dalam persamaan (2.25). akan menghasilkan :

$$E\frac{I_e}{I} = \left[\frac{E_t A/E - 2A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right]E \qquad (2.26)$$

Jadi,

$$Fcr = \frac{\pi^2.Ek}{(k.l/r)^2} \qquad (2.27)$$

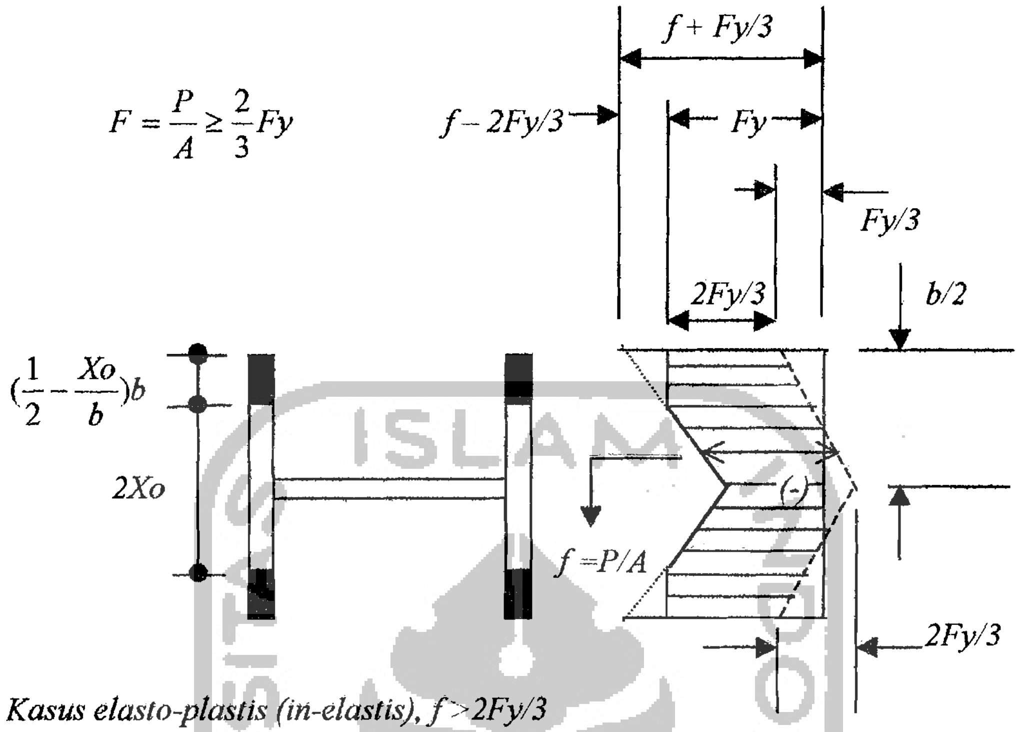
adalah persamaan pendekatan untuk k yang ditentukan oleh persamaan (2.20), persamaan yang lebih tepat diperoleh dengan memasukkan persamaan (2.26) ke persamaan (2.1), menghasilkan :

$$Fcr = \frac{\pi^2 E}{(k.l/r)^2}\left[\frac{E_t A/E - 2A_w/3}{2A_f + A_w/3}\right] \qquad (2.28)$$

untuk tekuk terhadap sumbu kuat *(x-x)*.

Dari pembahasan di atas jelas bahwa dua persamaan diperlukan untuk menentukan kekuatan kolom secara tepat, yaitu satu untuk tekuk terhadap sumbu kuat dan tekuk terhadap sumbu lemah. Harga I_e/I tidak merupakan fungsi dari distribusi tegangan residu bila harga ini memenuhi syarat geometris umum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, namun tegangan kritis *Fcr*, yang dihitung sebagai beban tekuk dibagi oleh luas bruto, berkaitan dengan *k.l/r* yang tergantung pada tegangan residu.

Penggunaan fungsi *Ie/I* dalam analisis kekuatan penampang kolom ditentukan oleh besarnya tegangan residu dan pola distribusi tegangan residu yang terkandung. Kolom baja dengan profil penampang H atau I dalam analisis kekuatan terhadap perilaku tekuk inelastis mengabaikan sumbangan kekuatan dari tebal badan yang bersifat elastis. Sebagai contoh diberikan analisis kekuatan kolom dengan tegangan residu maksimum sebesar 0,3.Fy dan pola distribusi tegangan residu linier seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Perilaku inelastis terjadi akibat beban luar lebih besar dari 2 kali tegangan residu.

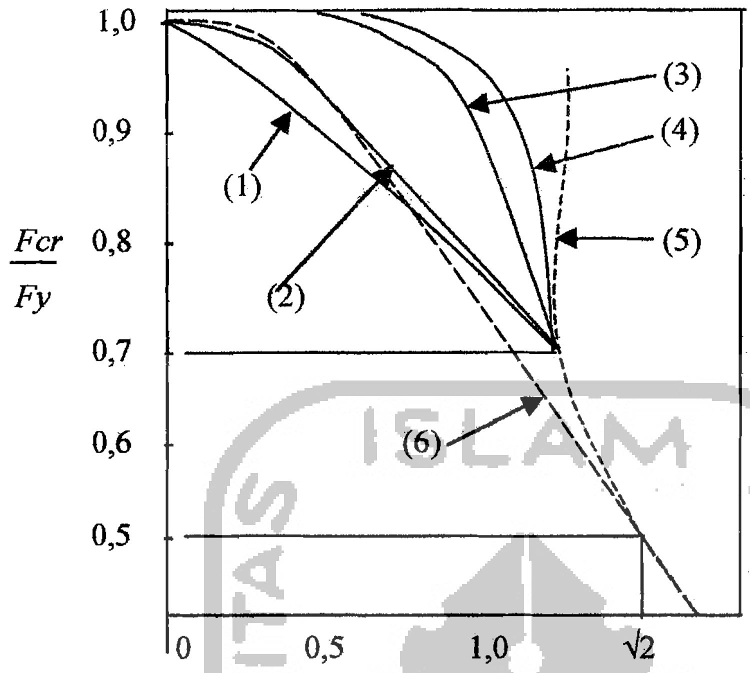


Kasus elasto-plastis (in-elastis), f >2Fy/3

Gambar 2.8 Diagram Tegangan pada Penampang yang mengandung Tegangan Residu pada Kondisi inelastis.

***Sumber :** Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku*

Pada keadaan tersebut ujung sayap telah meleleh sehingga Ie lebih kecil daripada I. Penentuan harga Ie dilakukan dengan menentukan besarnya bagian serat penampang yang telah mengalami leleh dan yang masih elastis. Hal ini sulit dilakukan sehingga analisis kekuatan kolom dengan perilaku tekuk inelastis dilakukan dengan menggunakan kurva kekuatan kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



$$\lambda = \frac{k.l}{r}\sqrt{\frac{Fy}{\pi^2.E}}$$

Gambar 2.9. Kurva kekuatan kolom Profil I yang memiliki tegangan residu pada ujung sayap

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Keterangan kurva :

1. Sumbu lemah tegangan residu linier
2. Sumbu lemah tegangan residu parabolis
3. Sumbu kuat tegangan residu linier
4. Sumbu kuat tegangan residu parabolis
5. Kurva Euler
6. Kurva kekuatan dasar SSRC

Kurva kekuatan kolom dengan distribusi tegangan residu yang berupa distribusi tegangan parabolis dan linier sepanjang sayap diperlihatkan pada Gambar 2.9. Kurva (2), (3), (4) pada Gambar 2.9. sesungguhnya berbentuk parabola. Dikarenakan hasil percobaan pada penelitian umumnya menunjukkan variasi yang hampir sama, maka pemakaian kurva pada gambar 2.9. dapat diterima.

Kurva kekuatan kolom yang digunakan oleh Column Research Council pada Gambar 2.9. adalah berupa parabola dalam bentuk persamaan :

$$Fcr = A - B\left[\frac{k.l}{r}\right]^2 \quad \text{...(2.29)}$$

Harga konstanta A dan B di dapat dari keadaan di mana $Fcr = Fy$ pada $k.l/r = 0$, sehingga persamaan (2.29) menjadi :

$$Fcr = Fy - \frac{Fp}{\pi^2.E}(Fy - Fp)\left(\frac{k.l}{r}\right)^2 \quad \text{...(2.30)}$$

Di mana harga Fp adalah tegangan pada batas proporsional. Dengan adanya tegangan residu pada penampang terjadi deviasi dari kekakuan elastis pada kurva tegangan – regangan rata-rata, maka harga $Fp = Fy - Fr$ dan persamaan (2.30) menjadi :

$$Fcr = Fy\left[1 - \frac{\mathrm{Fr}}{\pi^2.E}\left(\frac{Fy - Fr}{Fy}\right)\left(\frac{k.l}{r}\right)^2\right] \quad \text{.....................................(2.31)}$$

Persamaan (2.30) digunakan untuk menentukan terjadinya gabungan tekuk terhadap sumbu kuat dan tekuk terhadap sumbu lemah, dengan mengambil harga tegangan residu sebesar $0,5.Fy$. Penentuan harga tegangan residu tersebut dilakukan untuk menghasilkan perubahan yang berangsur-angsur dari kurva Euler bagi tekuk elastis parabolis yang menyatakan tekuk inelastis. Kedua kurva bersinggungan pada harga $Fcr/Fy = 0,5$, oleh karena itu persamaan (2.31) menjadi :

$$Fcr = Fy\left[1 - \frac{Fy}{4.\pi^2.E}\left(\frac{k.l}{r}\right)^2\right] \qquad (2.32)$$

Kurva kekuatan kolom SSRC pada Gambar 2.9 terletak jauh di atas kurva (1) pada hampir seluruh jangkauannya, karena secara umum pola tegangan residu berada di antara linier dan parabolis. Jadi, kekuatan kolom tekuk sumbu lemah lebih mendekati dengan kurva SSRC.

Menggunakan tegangan kritis sebesar $0,5.Fy$ yang merupakan tegangan batas proporsional ke dalam persamaan (2.32), diperoleh angka kelangsingan kritis (Cc).

$$Fcr = 0,5.Fy = Fy\left[1 - \frac{Fy}{4\pi^2.E}\left(\frac{k.l}{r}\right)^2\right] \qquad (2.33)$$

$$Cc = \frac{k.l}{r} = \sqrt{\frac{2.\pi^2.E}{Fy}} \qquad (2.34)$$

Angka kelangsingan kritis (Cc) merupakan batas antara daerah elastis dan daerah inelastis yang dapat dinyatakan :

$\frac{k.l}{r} < Cc$ berarti tekuk yang terjadi pada daerah *inelastis*.

$\frac{k.l}{r} > Cc$ berarti tekuk yang terjadi pada daerah *elastis*.

2.3.4. Perilaku pembebanan

Perilaku pembebanan yang bekerja pada kolom mempengaruhi timbulnya gaya-gaya yang bekerja pada penampang kolom. Beban aksial yang bekerja konsentris terhadap sumbu koordinat penampang kolom akan menimbulkan tegangan yang sama dan merata pada setiap permukaan penampang kolom. Beban aksial yang bekerja secara eksentris akan menimbulkan gaya lain yang berupa gaya momen yang disebabkan oleh eksentrisitas. Distribusi tegangan pada penampang kolom menjadi tidak seragam pada setiap penampang kolom.

Prinsip tegangan yang dihasilkan oleh perilaku beban yang bekerja secara eksentris ditunjukkan pada Gambar 2.9. Tegangan yang terjadi adalah tegangan seragam akibat gaya aksial dan tegangan yang diakibatkan oleh momen.

$$fa = \frac{P}{A}$$

$fb = \dfrac{M.c}{I}$, di mana M = P. e

c = letak garis netral ($d/2$)

$$fb = \frac{(P.e).c}{I}$$

Didapatkan tegangan kombinasi,

$$f_{aktual} = fa + fb$$

$$f_{aktual} = \frac{P}{A} + \frac{(P.e).c}{I} \quad \text{...(2.35)}$$

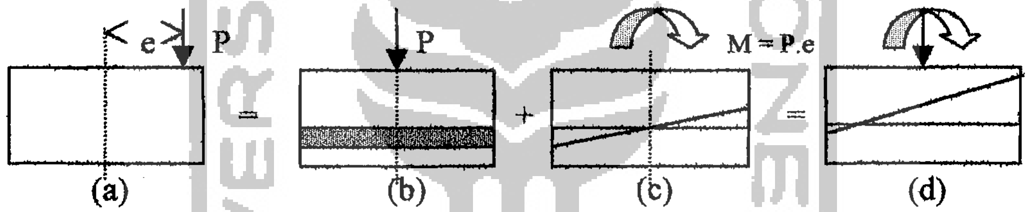
c = letak garis netral ($d/2$)

$$fb = \frac{(P.e).c}{I}$$

Didapatkan tegangan kombinasi,

$$f_{aktual} = fa + fb$$

$$f_{aktual} = \frac{P}{A} + \frac{(P.e).c}{I} \quad \text{.......(2.35)}$$



Gambar 2.10. Distribusi tegangan akibat beban eksentris

Sumber : Struktur

Gambar 2.10. (a) menunjukkan perilaku pembebanan yang bekerja secara eksentris.

Gambar 2.10.(b) menunjukkan tegangan yang terjadi akibat beban aksial didistribusikan merata ke seluruh penampang.

Tegangan yang tidak seragam pada seluruh penampang akibat perilaku eksentris pembebanan ditunjukkan Gambar 2.10.(c).

Tegangan kombinasi dari tegangan akibat gaya aksial tekan dan akibat eksentrisitas gaya aksial tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.10.(d).

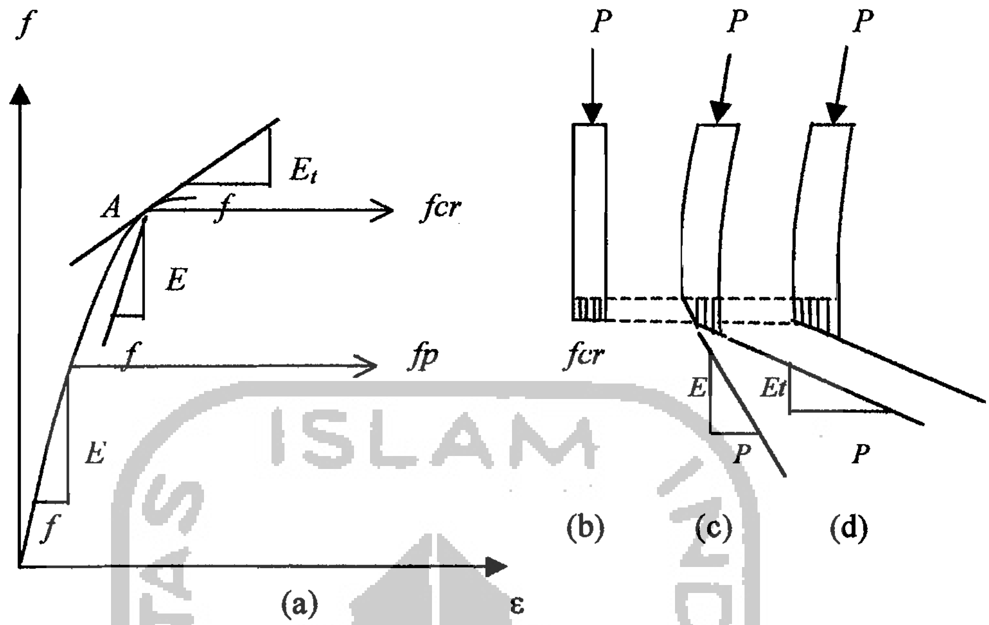
pada kurva Euler. Pemakaian nilai modulus elastisitas pada persamaan Euler yang mempunyai harga tetap tidak berlaku.

2.4.1. Teori Tangen Modulus

Perencanaan dan analisis kekuatan suatu kolom yang mengalami tekuk di atas batas proporsional memerlukan beberapa asumsi terhadap perilaku kolom. Prinsip kolom ideal dan batasan-batasan mengenai sifat bahan dan gaya-gaya yang terjadi diberikan untuk perencanaan kolom inelastis. Batasan terhadap perilaku kolom ditentukan sebagai berikut :

1. Kolom lurus sempurna dan prismatis.
2. Resultante beban kerja melalui sumbu bahan kolom sampai kolom mulai melendut.
3. Kondisi ujung merupakan statis tertentu sehingga panjang tekuk dapat ditentukan.
4. Sifat tegangan-regangan desak sama di seluruh bagian penampang.
5. Tegangan internal akibat pendinginan setelah panggilingan dan akibat pengelasan.
6. Lendutan yang kecil seperti pada lendutan yang umum berlaku dan gaya geser dapat diabaikan.
7. Tidak terjadi puntiran atau torsi pada penampang selama melentur.

Mekanisme kerja kolom menurut teori tangen modulus ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Prinsip kerja teori Tangen Modulus.

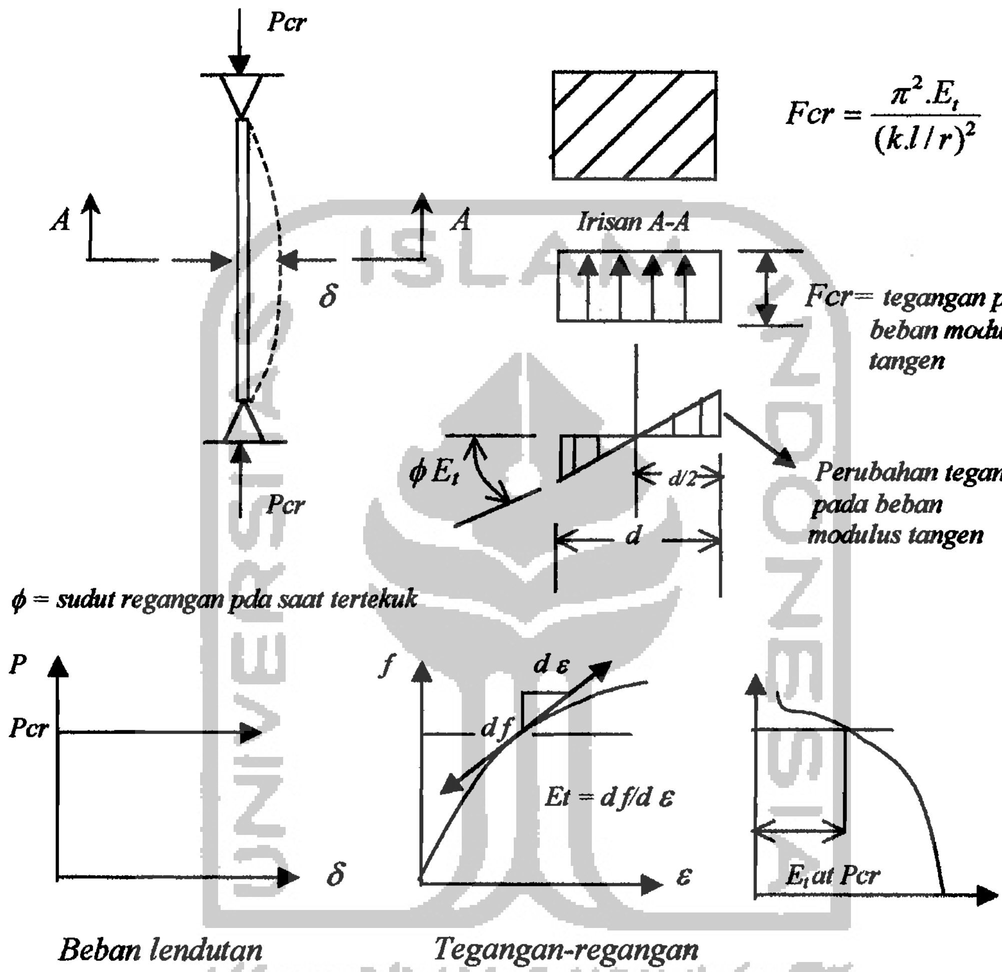
Sumber : Design of Steel Structure

Beban kritis pada teori tangen modulus ditentukan dengan mengasumsikan beban aksial bertambah selama terjadi perubahan bentuk dari keadaan lurus sampai keadaan mulai melendut. Distribusi tegangan yang terjadi pada penampang sampai keadaan mulai melendut dianggap merata, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11(b).

Anggapan kolom pada kondisi inelastis mencapai beban kritis di atas batas proporsional ditunjukkan gambar selanjutnya. Penambahan beban aksial pada saat kolom mulai melendut mengakibatkan penambahan tegangan lebih besar dari pada penurunan tegangan selama proses melendut pada bagian sisi luar yang cembung, sehingga tidak terjadi regangan balik pada bagian sisi cembung. Tegangan tekan bertambah untuk seluruh penampang dan hubungan antara tegangan – regangan untuk seluruh penampang ditentukan oleh nilai modulus tangen (E_t).

Teori tangen modulus memberikan perlakuan bahwa beban aksial bertambah selama kolom mulai melendut sampai tercapai beban kritis, sehingga kolom akan tetap setimbang pada beban di atas beban maksimum menurut teori Euler. Hal ini menunjukkan definisi mengenai beban kritis yang menganggap beban tercapainya kesetimbangan kolom dari keadaan lurus sampai mulai melendut tidak tepat lagi. Teori tangen modulus mendefinisikan beban kritis sebagai beban terkecil terjadinya keseimbangan antara dua keadaan (kolom pada saat mulai melendut), atau beban terkecil di mana pola deformasi kolom tiba-tiba berubah. Definisi ini digunakan dalam pembahasan mengenai tekuk inelastis.

Kolom dengan keadaan awal lurus akan tetap lurus sampai beban aksial P setara dengan beban kritis. Kolom mulai berubah dari keadaan lurus ke keadaan sedikit melendut dengan beban aksial P bertambah sebesar Δp menjadi $P + \Delta p$ (Gambar 2.11.d). Harga Δp ditentukan lebih besar dari harga momen lentur pada penampang balok sehingga tegangan pada setiap bagian penampang kolom bertambah selama kolom melendut. Jika deformasi yang terjadi pada saat beban kritis terlampaui sangat kecil, penambahan tegangan ΔF yang terjadi selama kolom melendut sangat kecil dibandingkan dengan tegangan kritis (Fcr). Modulus elastisitas yang terjadi pada saat tercapainya tegangan kritis (Fcr) disebut Modulus Tangen (E_t), yang berlaku untuk seluruh penampang kolom. Hal ini memberikan suatu pernyataan bahwa kenaikan tegangan pada kondisi tekuk inelastis bukan tergantung pada harga modulus elastisitas (E), akan tetapi tergantung pada kenaikan harga regangan modulus tangen. Mekanisme kerja teori tangen modulus ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Mekanisme kerja teori tangen modulus.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Gambar 2.12 tersebut menunjukkan kolom tetap lurus sampai sesaat sebelum runtuh dan modulus elastisitas pada saat runtuh adalah tangen sudut garis singgung pada kurva tegangan-regangan.Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa pada tegangan tertentu, $F_{cr} = P_{cr}/A$, batang akan mengalami bentuk lendutan yang tak stabil dan deformasi pada F_{cr} ditentukan oleh $E_t = df/d\varepsilon$. Maka persamaan menjadi :

$$Fcr = \frac{P_t}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(k.l/r)^2} \qquad (3.36)$$

dengan P_t adalah beban modulus tangen.

2.4.2. Faktor $\tau = E_t / E$

Faktor $\tau = E_t / E$ merupakan faktor yang penting dalam menganalisis masalah tekuk terutama perencanaan kolom yang menggunakan kurva kolom.

Dari persamaan (2.29) sebagai berikut :

$$Fcr = A - B\left[\frac{k.l}{r}\right]^2 \qquad (2.37)$$

Dengan harga A dan B tergantung pada *Fy* dan *Fp*. Nilai *Fcr* dapat juga dinyatakan sebagai berikut :

$$Fcr = \frac{P_t}{A} = \frac{\pi^2.E_t}{\left(\frac{l}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2.E.\tau}{\left(\frac{l}{r}\right)^2} \qquad (2.38)$$

Mensubstitusikan harga (*l/r*) dari persamaan (2.29) ke dalam persamaan (2. 37) diperoleh :

$$\tau = \frac{Fcr\,(A - Fcr)}{\pi^2.E.B} \qquad (2.39)$$

Mengganti nilai A dengan *Fy* dan nilai π^2 EB dengan *Fp(Fy – Fp)* diperoleh persamaan :

$$\tau = \frac{(Fy - Fcr).Fcr}{(Fy - Fp).Fp} \quad \text{...} (2.40)$$

Dimana : $\tau = \frac{E_t}{E} = \frac{\text{modulus tangen}}{\text{modulus elastis}}$

Fy = Tegangan leleh bahan

Fcr = Tegangan kritis

Fp = Tegangan proporsional

2.5. Kolom dengan Pembebanan Eksentris

Analisa perilaku kolom yang mengalami kombinasi tegangan kerja perlu dilakukan disebabkan kenyataan di lapangan kondisi ideal kolom tidak dapat terpenuhi.

Pembebanan eksentris adalah merupakan salah satu perilaku kolom yang menghasilkan beban kerja kombinasi yaitu berupa tegangan akibat gaya aksial dan momen akibat eksentrisitas.

Apabila beban bekerja secara eksentris (yaitu tidak bekerja di pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek bebab eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka di seluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik.

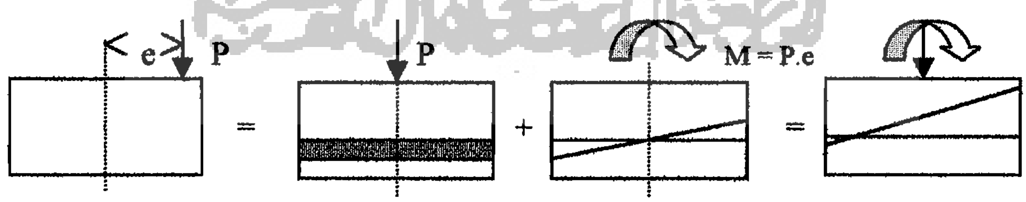
Perilaku kolom dengan pembebanan eksentris dipengaruhi oleh sifat kolom. Untuk kolom pendek lendutan yang terjadi relatif kecil sehingga dapat

Pembebanan eksentris adalah merupakan salah satu perilaku kolom yang menghasilkan beban kerja kombinasi yaitu berupa tegangan akibat gaya aksial dan momen akibat eksentrisitas.

Apabila beban bekerja secara eksentris (yaitu tidak bekerja di pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek bebab eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka di seluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik.

Perilaku kolom dengan pembebanan eksentris dipengaruhi oleh sifat kolom. Untuk kolom pendek lendutan yang terjadi relatif kecil sehingga dapat diabaikan dalam hubungannya dengan eksentrisitas, sedangkan lendutan pada kolom panjang/ langsing harus diperhitungkan.

Eksentrisitas pada kolom adalah beban yang bekerja di luar sumbu bahan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13 berikut ini :



Gmbar 2.13. Distribusi tegangan akibat beban eksentris.

Sumber : Struktur

Dari gambar 2.13 di atas terlihat dengan jelas bahwa eksentrisitas beban eksentris yang bekerja pada penampang melintang bahan mngakibatkan distribusi mengikuti perilaku linier Euler, maka harus dimasukkan pengaruh tekuk inelastis sehingga persamaan (2.41) dan (2.42) berubah menjadi :

$$Pcr = \frac{\pi^2 . E_t . I}{l^2}$$

$$F\max = -\frac{\pi^2 . E_t . I}{A . l^2} \pm \frac{\pi^2 . E_t . I . e . x}{l^2 . I}$$

atau,

$$F\max = -\frac{\pi^2 . E_t . I}{A . l^2} \pm \frac{\pi^2 . E_t . I . e . y}{l^2 . I} \qquad \text{.......................................(2.43)}$$

Di mana :

E_t = modulus tangen

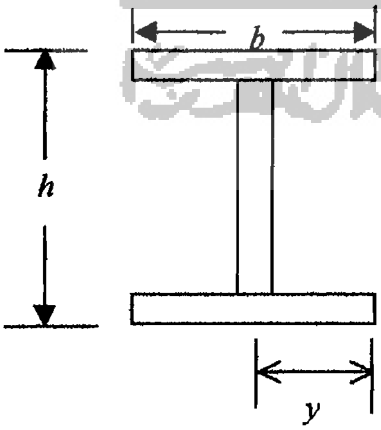
I = momen inersia penampang

e = eksentrisitas pembebanan

y = jarak serat terluar dari penampang terhadap sumbu lemah

l = panjang efektif

r = jari-jari girasi penampang



b = lebar profil

h = tinggi profil

Gambar 2.14. Penampang lintang profil W.

Sumber : Struktur.

Persamaan (2.43) menunjukkan perilaku pembebanan eksentris yang akan penambahan tegangan kerja pada salah satu sisi penampang dan pengurangan beban kerja pada sisi yang lain seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Kolom akan mengalami keruntuhan pada saat tegangan leleh bahan terlampaui.

Persamaan (2.43) harga tegangan maksimum yang akan terjadi dengan asumsi harga eksentrisitas.

Analisis kolom tekuk inelastis menggunakan kurva kekuatan kolom sehingga harga tegangan kritis telah diketahui dengan penentuan harga modulus tangen terjadi. Beban maksimum yang dapat didukung kolom ditentukan dengan persamaan (2.44).

$$Fcr = -\frac{P}{A} - \frac{P.e.y}{I}$$

$$Fcr = -P\left[\frac{1}{A} + \frac{e.y}{I}\right]$$

$$Pcr = Fcr / \left[\frac{1}{A} + \frac{e.y}{I}\right] \qquad (2.44)$$

Besarnya harga eksentrisitas pembebanan maksimal pada perilaku pembebanan eksentris di mana pengaruh tegangan yang diakibatkan oleh momen lentur akibat eksentrisitas cenderung lebih kecil dan tidak mempengaruhi kestabilan struktur dibandingkan dengan tegangan akibat beban aksial adalah sama dengan jarak sumbu kern maksimum penampang. Mengasumsikan harga eksentrisitas dengan perbandingan terhadap lebar penampang (*b*) profil akan memberikan harga-harga beban aksial maksimum yang dapat didukung oleh kolom.

2.6. Daerah Kern

Daerah kern adalah batas eksentrisitas beban yang apabila beban tersebut bekerja pada batas itu, tegangan di seluruh penampang hanya tegangan tekan, seperti yang terlihat pada distribusi tegangan pada Gambar 2.13.

Tegangan aktual tentunya merupakan kombinasi dari kedua distribusi tegangan.

Tegangan merata = $fa = \frac{P}{A}$

Tegangan lentur = $fb = \frac{Mc}{I}$

Karena,

M = P.e

$Fb = \frac{(Pe).y}{I}$

Maka tegangan gabungan $= f_{aktual} = fa + fb = \pm \frac{P}{A} \pm \frac{(P.e)y}{I}$

Dengan memperhatikan distribusi tegangan yang diilustrasikan pada Gambar 2.13, terlihat bahwa besar tegangan lentur sebanding dengan eksentrisitas (e) beban. Pada gambar tersebut, beban vertikal (P) dapat menimbulkan tegangan tarik pada satu bagian penampang apabila eksentrisitasnya besar (yaitu tegangan lentur fb dominan dibandingkan dengan tegangan aksial). Apabila e = 0, jelas hanya akan terjadi tegangan fa. Oleh karena itu, tentu ada suatu batas eksentrisitas beban yang apabila beban bekerja pada batas itu, tegangan di seluruh penampang hanya berupa tegangan tekan. Dengan mudah titik itu dapat diperoleh dengan menuliskan kombinasi kedua jenis tegangan sama dengan nol ($fa + fb = 0$) dan menghitung eksentrisitasnya.

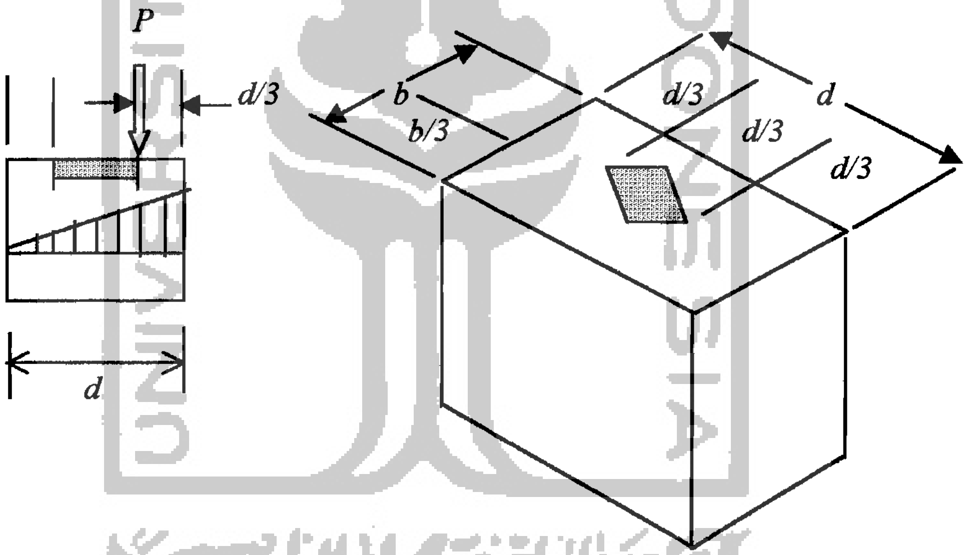
Jadi,

$$\frac{P}{A}+\frac{(P.e).y}{I}=0$$

atau,

$$e=\frac{I}{Ac}$$

Maka untuk penampang sigi empat seperti gambar berikut ini :

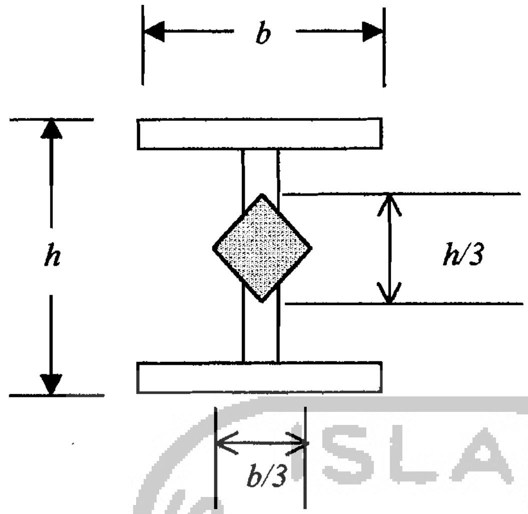


Gambar 2.15. Daerah kern penampang segi empat.

Sumber : Struktur

Daerah kerrn-nya adalah :

$$\frac{P}{bd}=\frac{P.e(d/2)}{b.d^3/12} \qquad \text{dan} \qquad e=\frac{d}{6}$$



Gambar 2.16. Batas daerah kern penampang profil W.

Sumber : Strength of Materials

Dengan cara yang sama untuk penampang profil W akan didapat batas daerah kern seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.15 di atas.

Dengan demikian, apabila beban bekerja di dalam daerah yang dibatasi ini, tegangan yang akan timbul hanyalah tegangan tekan, tidak ada tegangan tarik. Dengan menempatkan beban tepat pada titik batas tersebut, maka tegangan di tepi sisi lawannya akan sama dengan nol. Apabila eksentrisitasnya melampaui batas itu, akan timbul tegangan tarik pada sisi lawannya. Oleh karena beban dapat mempunyai titik tangkap di kedua sisi penampang, maka titik kern juga ada di kedua bagian. Lokasinya adalah pada titik sepertiga penampang. Oleh karena itu, aturan sepertiga tengah diterapkan pada batas daerah kern tampang profil W, yang berarti mengusahakan agar beban mempunyai titik tangkap di dalam sepertiga tengah penampang agar tidak terjadi tegangan tarik atau dengan kata lain, kolom tetap berperilaku sebagai kolom dan bukannya berperilaku sebagai balok-kolom.