
BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

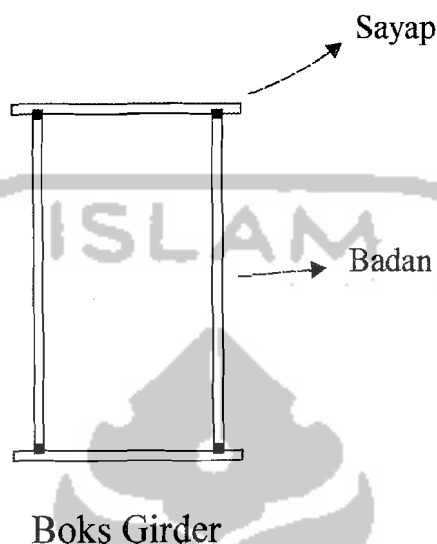
3.1.1 Gelagar Plat

Gelagar penampang kotak (*box girder*) akan memberikan kekakuan puntir yang sempurna pada jembatan berbentang panjang. Gelagar boks tersusun atau didesain dari dua sayap dan dua plat badan membentuk penampang kotak (gambar 3.1). Kedua sayap gelagar berfungsi untuk memikul momen dan gaya tekan sedangkan badan berfungsi untuk menahan gaya geser, sebagian kecil momen dan menghubungkan kedua sayap agar bekerja sebagai satu kesatuan.

Untuk mendapatkan gelagar plat yang ekonomis, kuat dan terhindar dari kegagalan dini (*premature collapse*) yang disebabkan oleh *instabilitas*, biasanya badan gelagar plat diberi pengaku transversal berupa pengaku landasan dan pengaku antara. Pengaku landasan dipasang pada tempat yang menerima beban terpusat dan reaksi untuk menyalurkan beban terpusat ke seluruh tinggi web. Pengaku antara transversal dipasang dalam jarak bervariasi di sepanjang bentang dan berfungsi untuk memperbesar kekuatan tekuk pelat badan. Pengaku akan memperbesar tahanan badan terhadap kombinasi geser dan momen. Untuk plat dengan badan yang lebih tinggi, khususnya pada lokasi yang momennya besar, pengaku badan longitudinal

mungkin juga diperlukan. Efisiensi menyeluruh biasanya diperoleh dengan menggunakan plat badan yang tebalnya cukup sehingga pengaku tidak diperlukan.

(Spiegel dan Kriger, 1991).



Gambar 3.1 menggambarkan penampang melintang gelagar boks.

3.1.2 Stabilitas Plat

Stabilitas plat yang pendekatannya mengikuti uraian Timoshenko yang dimodifikasi oleh Gerstle, disamping suku umum q yang menyatakan komponen beban transversal akibat lenturan plat, komponen transversal dari gaya tekan N_x ketika plat melendut ke posisi tertekuk perlu ditinjau. Persamaan differensial untuk lenturan plat homogen yang diturunkan dari teori plat oleh Timoshenko (1959), yang ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q \dots \dots \dots (3.1)$$

D = rigiditas fleksural per panjang satuan plat.

q = beban pada bentang balok.

Jika persamaan Persamaan 3.1 dituliskan untuk balok dengan lebar b , persamaan diferensial untuk beban menjadi

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = qb \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan qb adalah beban persatuan panjang bentang balok.

Persamaan diferensial, Persamaan 3.1 menjadi

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

Karena $N_x = F_{cr} t$ dan $D = Et^3/[12(1-\mu^2)]$, tegangan tekuk elastis dapat dituliskan sebagai

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

Untuk kasus khusus pada plat yang ditekan secara merata-tepi longitudinal bertumpuan sederhana, harga k menurut **Salmon dan Johnson (1994)** adalah

$$k = \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \dots\dots\dots (3.5)$$

Koefisien tekuk k merupakan fungsi dari jenis tegangan (dalam hal ini tekanan merata pada dua tepi yang berseberangan) dan kondisi tumpuan tepi (dalam hal ini keempat tepi merupakan tumpuan sederhana, disamping aspek rasio a/b yang terdapat langsung dalam persamaan. Semakin besar nilai koefisien tekuk (k) maka nilai tegangan kritis akan menjadi besar yaitu dengan cara mengubah tumpuan tepi menjadi jepit-jepit.

3.1.3 Balok Tekuk Lokal

Salmon dan Johnson (1992) menyatakan bahwa bila balok memiliki stabilitas lateral yang cukup pada flens tekannya, satu-satunya keadaan batas yang mungkin membatasi kekuatan momen adalah tekuk lokal pada tekan flens dan atau elemen pelat yang membentuk penampang lintang balok itu.

Menurut Salmon dan Johnson (1992) tekuk lokal dipengaruhi oleh nilai b/t . Bila nilai b/t rendah, pengerasan regangan dapat tercapai tanpa terjadinya tekuk; sedang untuk harga b/t menengah, tegangan sisa dan ketidak sempurnaan menyebabkan tekuk tak elastik atau masa transisi dan untuk b/t besar maka akan melampaui kekuatan tekuk yakni pelat itu akan menunjukkan terjadinya kekuatan pasca tekuk.

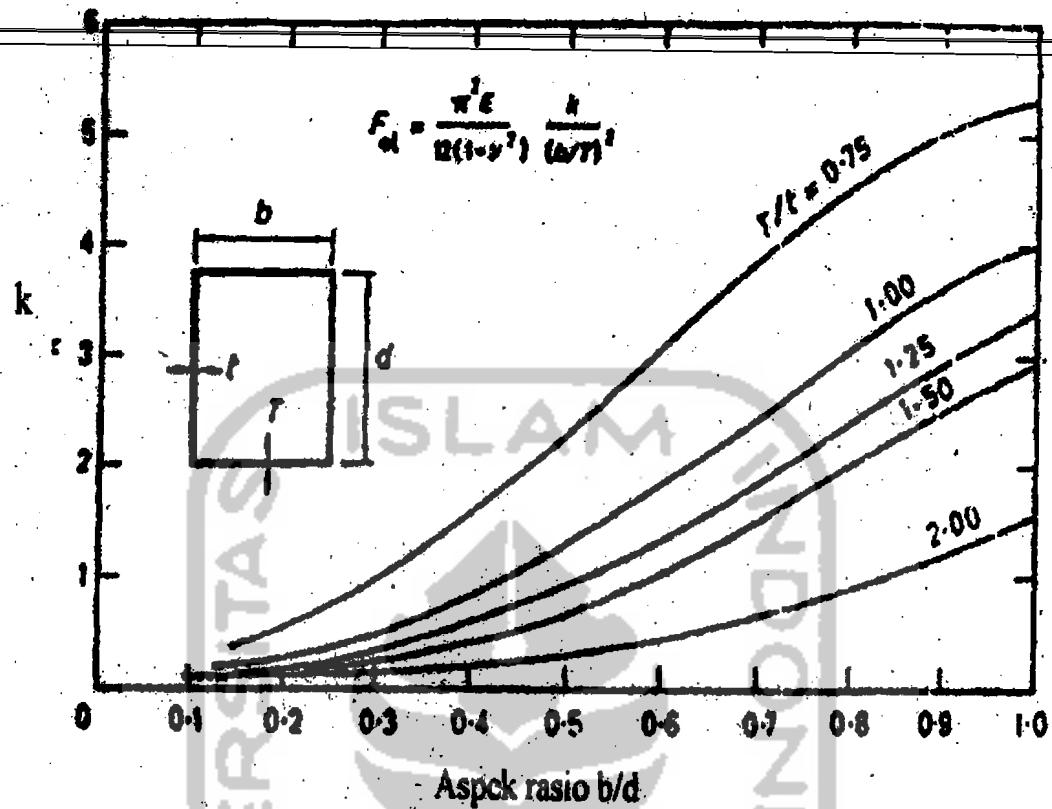
Tekuk lokal selain dipengaruhi oleh nilai b/t juga dipengaruhi oleh nilai koefisien tekuk (k) yaitu semakin besar nilai koefisien tekuk maka semakin besar pula nilai tegangan kritis tekuk yang terjadi.

Persyaratan untuk mencapai tegangan leleh tanpa tekuk lokal adalah :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \dots \dots \dots (3.6)$$

dengan k adalah konstanta tekuk merupakan fungsi distribusi tegangan dan kondisi di tepi pelat.

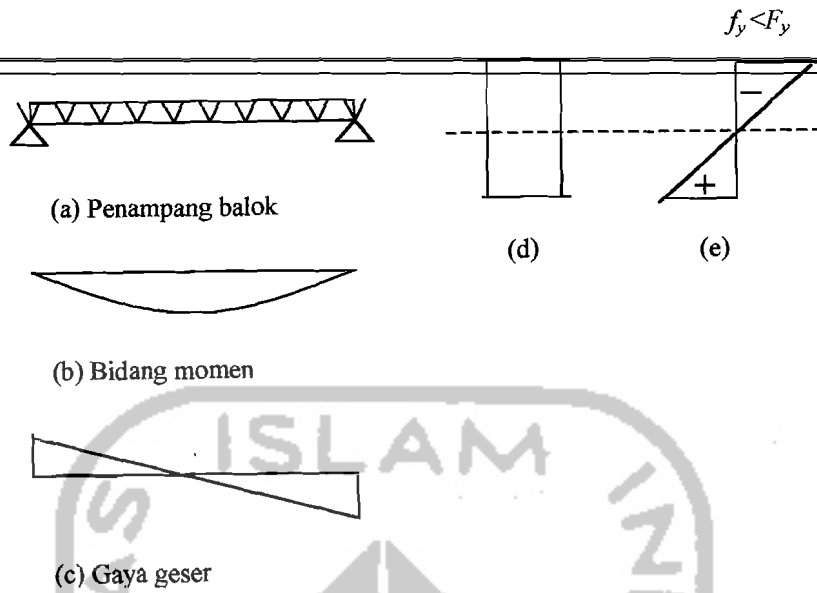
Pada Gambar 3.2 menunjukkan nilai koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak yang dipengaruhi oleh rasio lebar sayap terhadap tinggi badan (b/d) (0-1) dan T/t (0.75; 1.00; 1.25; 1.50; 2.00), nilai k besar bila b/d besar T/t kecil.



Gambar 3.2 Koefisien tekuk lokal pada pelat tipis bentuk penampang kotak
(Trahair dan Bradford, 1998)

3.1.4 Balok Lentur

Menurut Bowles (1980) komponen struktur yang mengalami lentur banyak dijumpai sebagai balok maupun gelagar. Salah satu contoh struktur yang mengalami lentur adalah balok sederhana (*simple beam*) yang penampangnya berbentuk kotak menerima beban terdistribusi (Gambar 3.3a), akibat beban tersebut balok menerima momen lentur (Gambar 3.3b) dan gaya geser (Gambar 3.3c). Akibat momen, penampang balok mengalami tegangan lentur (*bending stress*) (Gambar 3.3e), sedangkan gaya geser menimbulkan tegangan geser. Dalam keadaan penampang masih elastis, distribusi tegangan pada penampang balok linier.



Gambar 3.4 Balok statis tertentu dengan beban terdistribusi merata

Tegangan pada serat yang letaknya y dari sumbu netral (Bowles, 1980) adalah :

$$f_b = \pm \frac{M \cdot y}{I} \dots\dots\dots (3.8)$$

M = momen pada penampang yang ditinjau

Y = jarak serat yang ditinjau dari sumbu netral

I = momen inersia.

Tegangan maksimum akibat momen yang terjadi pada serat terluar yaitu serat yang letaknya terjauh dari sumbu netral. Jika penampang balok simetris dan jarak serat terluar ke sumbu netral dinyatakan dengan C , maka tegangan maksimumnya adalah :

$$f_b = \pm \frac{M \cdot C}{I} \dots\dots\dots (3.9)$$

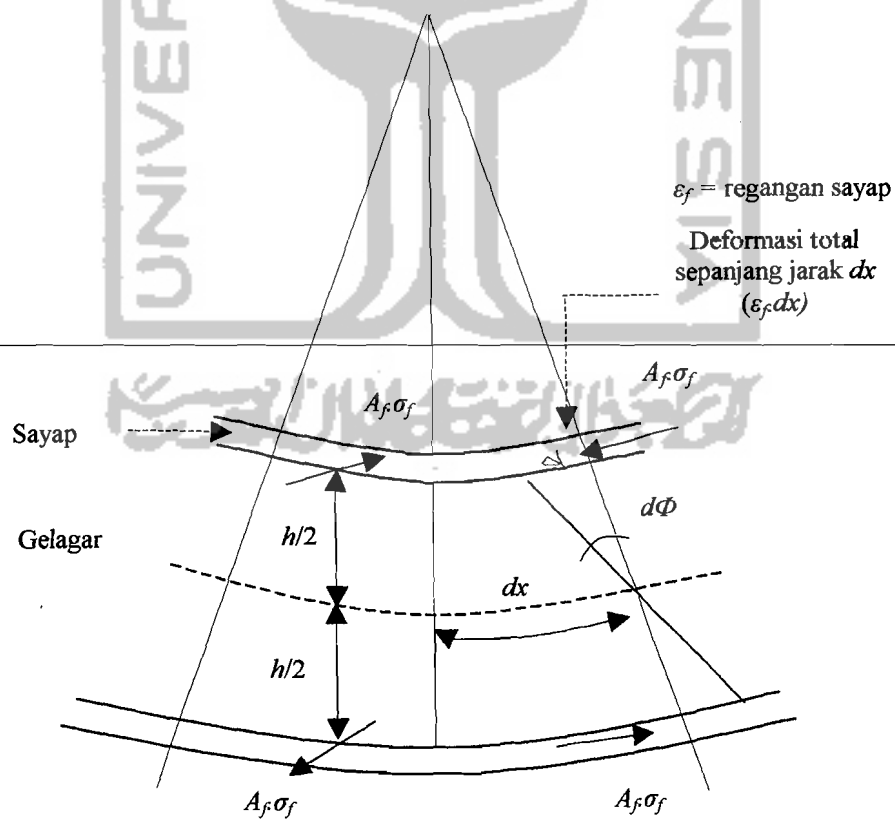
Karena $\frac{I}{C} = S$, Persamaan 3.9 dapat ditulis kembali dalam bentuk :

$$f_b = \pm \frac{M}{S} \dots \dots \dots (3.10)$$

Dimana S adalah modulus potongan (*section modulus*).

3.2 Tekuk Vertikal Pada Sayap

Gelagar yang melengkung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, kurvatur tersebut memperbesar komponen-komponen gaya flens yang mengakibatkan tegangan tekan pada tepi-tepi badan yang berhubungan dengan flens tersebut. Apabila badan balok tetap stabil terhadap tegangan tekan akibat komponen-komponen gaya tersebut, berarti sayap tidak dapat tertekuk vertikal (Salmon dan Johnson, 1996).



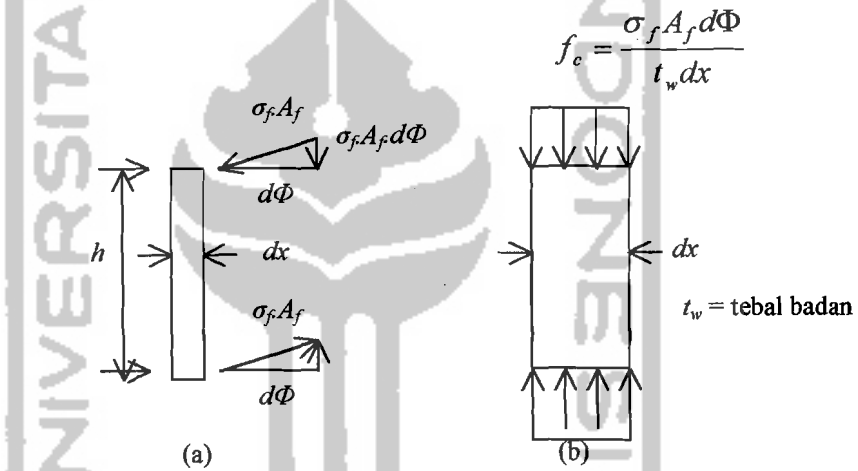
Gambar 3.4 Gaya sayap akibat lengkungan gelagar

Berdasarkan Gambar 3.4 deformasi total $\epsilon_f dx$ sepanjang jarak dx adalah :

$$\epsilon_f dx = d\Phi \frac{h}{2} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$d\Phi = \frac{2\epsilon_f}{h} dx \dots\dots\dots (3.12)$$

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5a komponen vertikal yang menimbulkan tegangan tekan adalah $\sigma_f A_f d\Phi$. Setelah dibagi dengan $t_w dx$ untuk memperoleh tegangan tekan f_c yang diperlihatkan Gambar 3.5b.



Gambar 3.5 Pengaruh komponen gaya sayap yang tegak lurus plat sayap

Persamaan 3.12 untuk $d\Phi$ dimasukkan sehingga :

$$f_c = \frac{\sigma_f A_f d\Phi}{t_w dx} = \frac{2\sigma_f A_f \epsilon_f}{t_w h} \dots\dots\dots (3.13)$$

Tegangan tekuk elastis untuk suatu plat menurut Salmon dan Johnson (1996) :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \dots\dots\dots (3.14)$$

di mana $b = h$, $t = t_w$, dan $k = 1$ untuk kasus plat Euler yang diasumsikan bebas di sepanjang pinggi-pinggir yang sejajar dengan pembebanan dan dijepit pada atas dan

bawahnya. Dengan demikian :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(h/t_w)^2} \dots \dots \dots (3.15)$$

Bila tegangan yang dikenakan, Persamaan 3.13, disamakan dengan tegangan kritis, Persamaan 3.15, akan diperoleh :

$$\frac{2\sigma_f A_f \epsilon_f}{t_w h} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(h/t_w)^2} \dots \dots \dots (3.16)$$

dengan memisalkan $t_w h = A_w$ akan memberikan :

$$\frac{h}{t_w} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{24(1 - \mu^2)} \left(\frac{A_w}{A_f} \right) \left(\frac{1}{\sigma_f \epsilon_f} \right)} \dots \dots \dots (3.17)$$

Untuk mencegah terjadinya tekuk maka nilai $f_c < F_{cr}$.

σ_f secara konservatif dianggap harus mencapai tegangan leleh F_{yf} agar kapasitas batas sayap tercapai. Jika tegangan residu F_r bekerja pada sayap maka regangan sayap total akan sama dengan jumlah tegangan residu ditambah tegangan leleh dengan demikian :

$$\epsilon = (F_r + F_{yf}) / E \dots \dots \dots (3.18)$$

Regangan ini adalah regangan sayap di dekat badan yang diperlukan.

Substitusi $\sigma_y = F_{yf}$, $\epsilon_f =$ Persamaan 3.18, $E = 200.000$ MPa, dan $\mu = 0,3$

sehingga Persamaan 3.17 menghasilkan

$$\frac{h}{t} = \frac{135.000 \sqrt{A_w / A_f}}{\sqrt{F_{yf}(F_{yf} + F_r)}} \dots \dots \dots (3.19)$$

yang merupakan harga h/t_w maksimum yang konservatif untuk mencegah tekuk

vertikal. A_w/A_f jarang sekali kurang dari 0,5 dan $F_r = 114$ MPa merupakan harga yang realistik. Jika harga-harga tersebut dimasukkan, maka :

$$\frac{h}{t_w} = \frac{96500}{\sqrt{F_{yf}(F_{yf} + 114)}} \dots\dots\dots (3.20)$$

bila a/h tidak melebihi 1,5 maka Persamaan 3.11 menjadi :

$$\frac{h}{t_w} = \frac{5250}{\sqrt{F_{yf}}} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3.11)$$

3.3 Tekuk Pada Bidang Badan

3.3.1 Tekuk Pada Badan Akibat Lentur

Menurut **Salmon dan Johnson (1996)**, tegangan tekuk elastik teoritik atau tegangan kritis plat yang tertekan dapat dinyatakan sebagai :

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \dots\dots\dots (3.22)$$

F_{cr} = tegangan kritis, k = koefisien tekuk, $\pi = 3,14$, E = modulus elastis, μ = rasio Poisson = 0,30, b = lebar sayap, t = tebal sayap, dalam hal ini $b = h$.

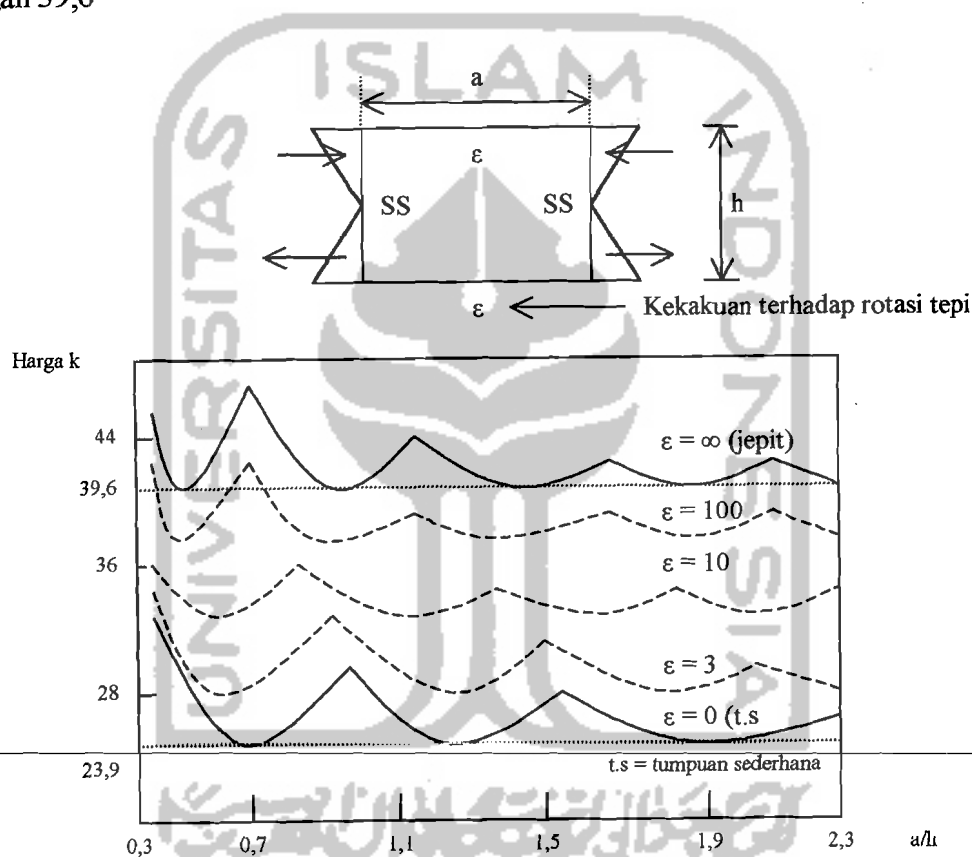
Penurunan harga k secara teoritis untuk lentur pada bidang plat dijabarkan oleh **Timoshenko dan Krieger (1959)**. Untuk sembarang jenis pembebanan nilai, k bergantung pada rasio bentuk a/h dan kondisi tumpuan sepanjang tepi. Variasi nilai k terhadap rasio a/h ditunjukkan pada Gambar 3.6. Penurunan harga k secara teoritis untuk lentur pada bidang plat dijabarkan oleh **Timoshenko dan Krieger (1959)**.

Tegangan kritis (dengan $E = 200.000$ MPa) bisa dikatakan terletak antara :

$$F_{cr} = \frac{4320000}{(h/t_w)^2} \text{ MPa untuk } k = 23,9 \text{ (tumpuan sederhana di sayap)}$$

$$F_{cr} = \frac{7120000}{(h/l_w)^2} MPa \text{ untuk } k = 39,6 \text{ (jepit sempurna di sayap)}$$

Apabila masing-masing gelagar tertentu akan memiliki derajat kekangan flens (k) yang berlainan, flens yang di las secara penuh ke sambungan badan tertentu akan mendekati kasus jepit penuh. Maka akan dipilih suatu harga k yang lebih dekat dengan 39,6



Gambar 3.6 Koefisien tekuk untuk plat yang mengalami lentur murni

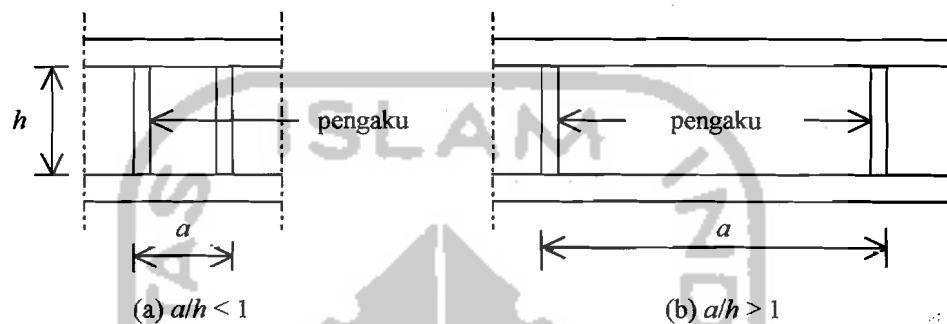
3.3.2 Tekuk Elastis Akibat Geser Murni

Menurut Timoshenko dan Kriger (1959) bahwa tipikal untuk kasus geser murni :

$$\tau_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(sisi.pendek / t)^2} \dots \dots \dots (3.23)$$

di mana untuk kasus tepi bertumpuan sederhana (yakni perpindahan dicegah tetapi rotasi terhadap tepi tidak dikekang) :

$$k = 5,34 + 4,0 \left(\frac{\text{sisi.pendek}}{\text{sisi.panjang}} \right)^2 \dots\dots\dots (3.24)$$



Gambar 3.7 Dua keadaan dari jarak pengaku antara

Untuk perencanaan, Persamaan 3.23 dan 3.24 biasanya dinyatakan dalam h (tinggi badan tanpa sokongan) dan a (jarak antara pengaku). Bila hal ini dilakukan maka ada dua kasus yang harus ditinjau :

1. Jika $a/h \leq 1$ (lihat Gambar 3.7a), maka Persamaan 3.22 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(a/h)^2] (h/a)^2}{12(1 - \mu^2)(a/t)^2 (h/a)^2} \dots\dots\dots (3.25)$$

2. Jika $a/h \geq 1$ (lihat Gambar 3.7b), maka Persamaan 3.24 menjadi :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 E [5,34 + 4,0(h/a)^2]}{12(1 - \mu^2)(h/t)^2} \dots\dots\dots (3.26)$$

Jelaslah dari Persamaan 3.25 dan 3.26 bahwa jika kita hendak memakai h/t sebagai rasio stabilitas pada penyebut, maka dua persamaan untuk k diperlukan. Untuk semua harga a/h , Persamaan 3.25 dan 3.26 bisa dituliskan sebagai :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.27)$$

dengan :

$$k = 4,0 + 5,34/(a/h)^2, \text{ untuk } a/h \leq 1 \quad (3.28)$$

$$k = 4,0/(a/h)^2 + 5,34, \text{ untuk } a/h \geq 1 \quad (3.29)$$

Dari persamaan 3.23 dan 3.29 tampak bahwa semakin kecil nilai a/h maka nilai koefisien tekuk geser plat (k) akan menjadi besar, dengan meningkatnya nilai koefisien tekuk geser plat maka nilai kapasitas geser plat akan meningkat.

Dalam AISC-1.10.5, persamaan 3.27 ditulis dalam bentuk tanpa dimensi, dengan mendefinisikan koefisien C_v sebagai perbandingan antara tegangan geser pada saat tertekuk dan tegangan leleh geser,

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 Ek}{\tau_y (12)(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.30)$$

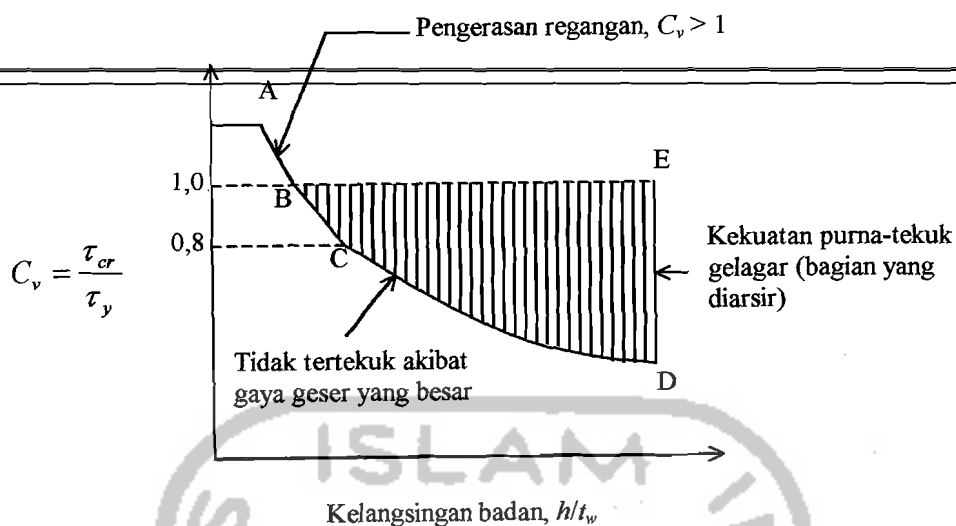
di mana merupakan C_v untuk stabilitas elastis.

Substitusi dari $E = 200000 \text{ MPa}$, $\mu = 0,3$, $\tau_y = 0,6 F_{yw}$ maka persamaaan 3.30

menjadi:

$$C_v = \frac{303000k}{(h/t)^2 F_{yw}} \quad (3.31)$$

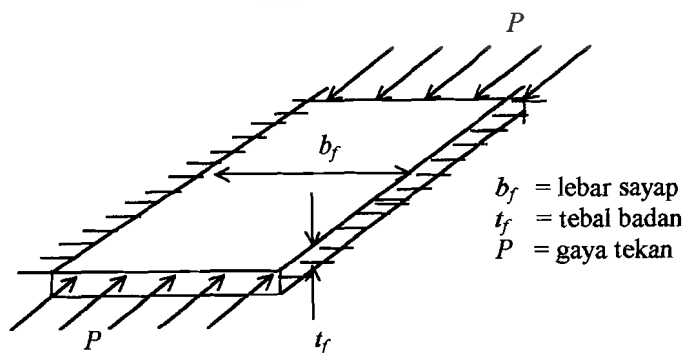
Tampak pada Gambar 3.8 bahwa nilai C_v semakin kecil pada nilai h/t semakin besar. Tekuk plat akibat geser murni baik elastis maupun inelastis menimbulkan tegangan kritis seperti yang ditunjukkan oleh garis ABCD pada gambar 3.8. Garis ABCD merupakan rasio tegangan kritis terhadap tegangan leleh geser.



Gambar 3.8 Kapasitas geser yang tersedia dengan menyertakan kekuatan purna tekuk

Plat yang diperkuat oleh sayap dan pengaku memiliki kekuatan purna tekuk yang cukup besar. Agar pemakaian bahan plat badan pada gelagar plat penampang kotak efisien, badan harus tipis sehingga tekuk terjadi pada tegangan geser yang ada. Dengan adanya pengaku kekuatan geser dapat dinaikan dari kekuatan berdasarkan tekuk (ABCD pada Gambar 3.8) mendekati kondisi yang selaras dengan leleh geser pada balok klasik (ABE Gambar 3.8).

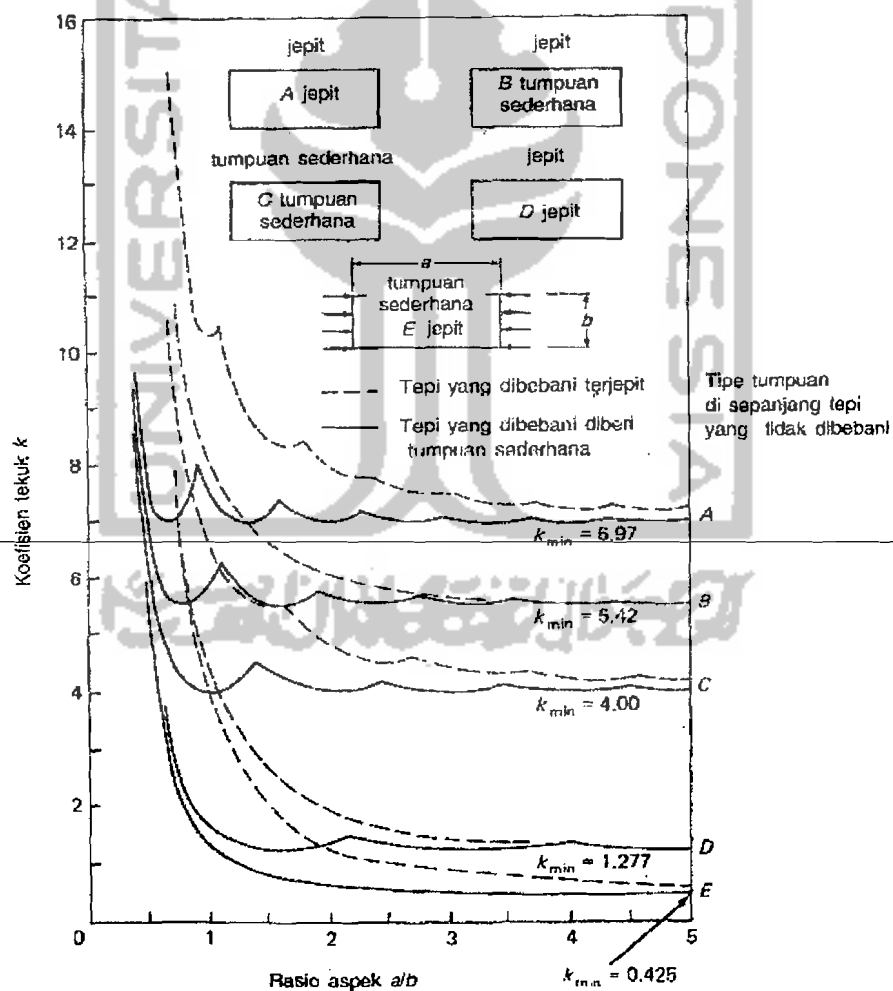
3.3.3 Tekuk Elastis Pada Plat Sayap



Gambar 3.9 Plat yang ditekan merata

Pada dasarnya, plat yang mengalami tekanan, seperti pada elemen sayap tekan, perilakunya sama dengan kolom. Tekuk plat yang mengalami tekanan merata ditunjukkan pada Gambar 3.9. Tegangan tekuk elastik teoritik atau tegangan kritis plat yang tertekan dinyatakan pada Persamaan 3.22.

Nilai k tergantung pada tipe tegangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio panjang terhadap lebar (rasio aspek) dari plat yang bersangkutan. Gambar 3.10 menunjukkan variasi k terhadap rasio aspek a/b untuk berbagai kondisi tumpuan tepi ideal (Charles G. Salmon dan John E. Johnson, 1996).



Gambar 3.10 Koefesien tekuk elastis untuk tekuk pada plat segi empat datar (Diambil dari George Gerard dan Herbert Becker, 1957)

Tampak bahwa untuk plat dengan kondisi tumpuan jepi-jepit (A) nilai $k_{min} = 6,97$. Untuk plat dengan tumpuan sederhana-jepit (B) nilai $k_{min} = 5,42$. Sedangkan plat dengan tumpuan sederhana-sederhana, nilai $k_{min} = 4$. Dan untuk plat dengan tumpuan jepit-bebas, nilai $k_{min} = 1,277$, serta untuk plat dengan tumpuan sederhana-bebas $k_{min} = 0,425$. Dalam penelitian ini dipakai plat dengan tumpuan jepit-bebas dengan nilai $k_{min} = 0,425$.

3.4 Kekuatan Lentur Batas Pada Gelagar

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Salmon dan Johnson (1996) dengan bahan penelitiannya adalah baja profil I dengan mutu baja A36, badan akan tertekuk akibat adanya tegangan lentur. Tekuk seperti ini tidak menyebabkan gelagar kehilangan daya gunanya. Kapasitas momen batas gelagar yang tinggi merupakan fungsi dari :

$$M_u = f \left\{ \frac{h}{t}, \frac{L}{r_y}, \frac{b}{t_f}, \frac{A_w}{A_f} \right\} \dots \dots \dots (3.32)$$

h/t = menentukan ketidak-stabilan badan (tekuk lentur)

L/r_y = menentukan ketidak-stabilan lateral pada sayap (tekuk puntir lateral)

b/t_f = menentukan tekuk setempat atau tekuk puntir) pada sayap

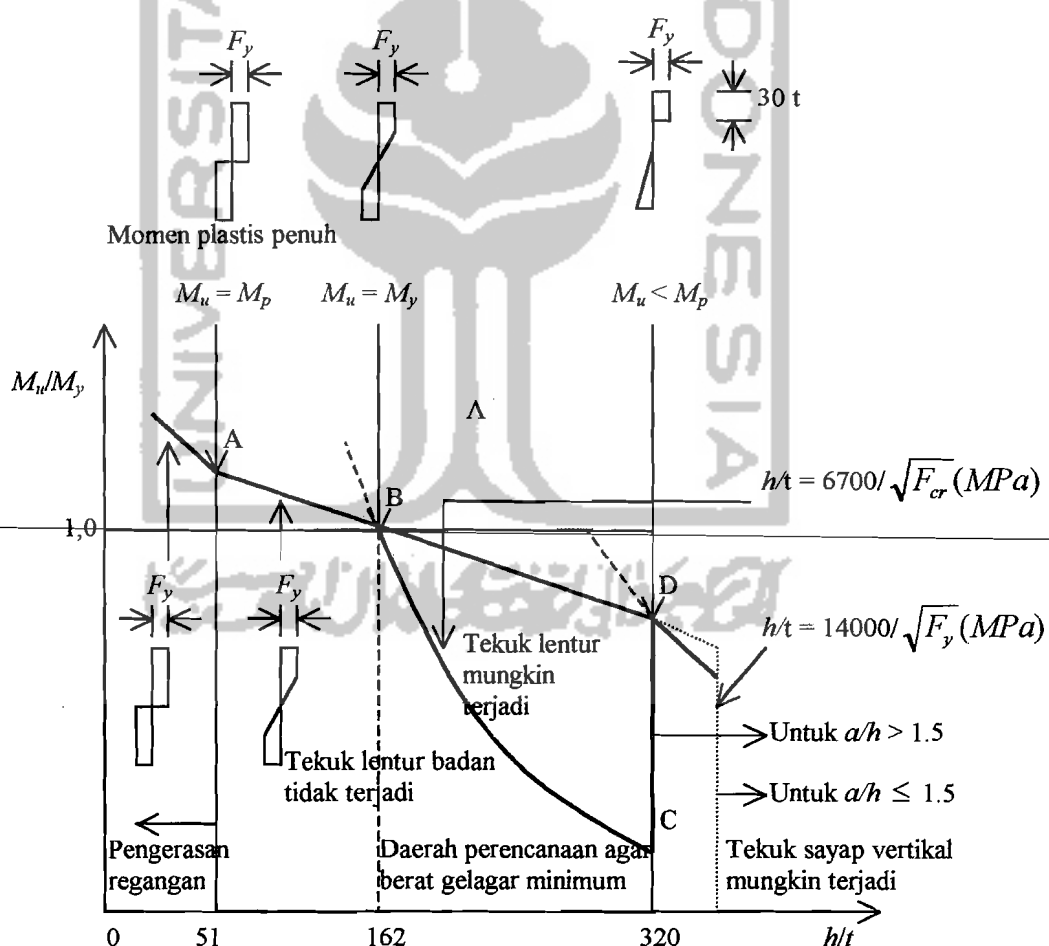
A_w/A_f = menentukan pengaruh purna tekuk badan pada sayap

Gambar 3.11 memperlihatkan hubungan antara kekuatan momen nominal M_n dan h/t_w . Gambar ini mengansumsikan bahwa keadaan batas tekuk puntir lateral dan tekuk flens lokal tidak menentukan. Dengan menganggap bahwa tekuk puntir lateral dan tekuk setempat dicegah seperti anggapan yang digunakan pada Gambar 3.11,

variabel dari fungsi diatas menjadi :

$$M_u = f \left\{ \frac{h}{t}, \frac{A_w}{A_f} \right\} \dots \dots \dots (3.33)$$

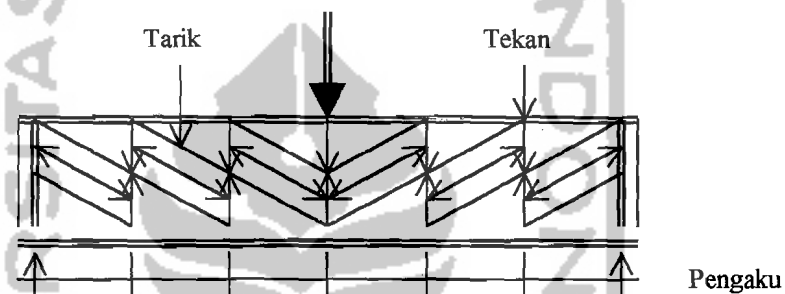
Dari gambar 3.11 tampak bahwa semakin besar nilai h/t_w maka nilai kapasitas momennya semakin menurun. Merujuk pada gambar 3.11 penurunan yang signifikan terjadi pada h/t_w lebih besar dari 162 yang ditunjukkan oleh kurva ABC, namun dengan memberi pengaku pada gelagar plat maka penurunan nilai kapasitas momennya tidak terlalu besar yang ditunjukkan oleh kurva ABD.



Gambar 3.11 Kekuatan lentur gelagar yang dipengaruhi oleh tegangan lentur pada plat badan : baja A36

3.5 Kekuatan Geser Nominal – Termasuk Aksi Medan Tarik

Gelagar plat dengan nilai h/t yang cukup kecil tidak mengalami tekuk geser dibawah tegangan luluh. Sebenarnya sebuah badan balok sebagai bagian dari bagian konstruksi lentur yang dipengaruhi oleh sebuah momen lentur pengangkut gaya geser tersebut di dalam sebuah ragam “medan tarik” di mana pengaku adalah bagian konstruksi desak dan segmen badan di antara pengaku adalah elemen tarik (Gambar 3.12)



Gambar 3.12 Aksi medan tarik

Kekuatan geser nominal V_n dapat dinyatakan sebagai jumlah dari kekuatan tekuk V_{cr} dan kekuatan pasca tekuk V_{tf} dari aksi tarik lapangan,

$$V_n = V_{cr} + V_{tf} \quad (3.34)$$

Kekuatan tekuk nominal dengan $V_n = V_{cr}$, maka :

$$V_{cr} = C_v \tau_y A_w \quad (3.35)$$

$$C_v = \tau_{cr} / \tau_y$$

Kekuatan geser V_{tf} yang berasal dari aksi medan tarik dalam badan gelagar menimbulkan suatu pita gaya-gaya tarik yang terjadi setelah badan itu mengalami tekuk akibat tekuk diagonal (tegangan-tegangan utama dalam teori balok biasa). Keseimbangan dipertahankan melalui transfer gaya ke pengaku vertikal. Dengan naiknya beban gelagar, sudut medan-tarik berubah untuk mengakomodasi kapasitas

menahan beban terbesar.

Menurut **Charles G. Salmon dan John E. Johnson (1996)** pada aksi medan tarik arah optimum, kontribusi ΔV_{ff} maksimum dari aksi medan tarik sebesar :

$$\Delta V_{ff} = \sigma_1 \frac{h_{tw}}{2} \left[\sqrt{1 + (a/h)^2} - a/h \right] \dots \dots \dots (3.36)$$

Sedangkan penyelesaian untuk V_{ff} pada kekuatan geser dari aksi medan tarik diberikan :

$$V_{ff} = \sigma_1 \frac{h_{tw}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \dots \dots \dots (3.37)$$

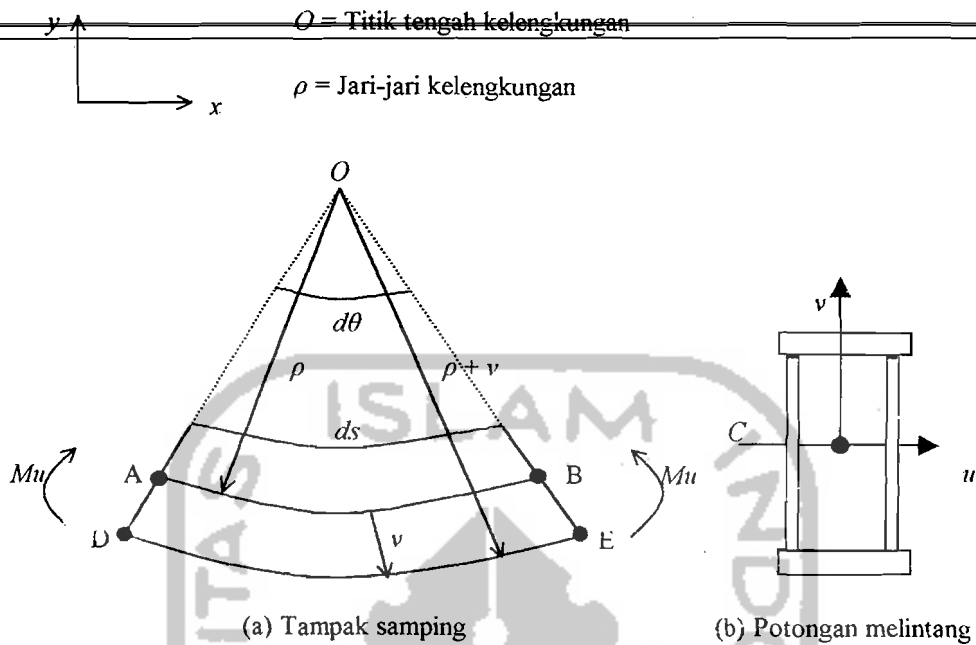
Bila kekuatan geser nominal V_n tercapai, termasuk aksi medan tarik dan tegangan leleh F_{yw} adalah tegangan pada badan gelagar maka gaya di dalam pengaku:

$$P_s = \frac{F_{yw} (1 - C_v) a t_w}{2} \left[1 - \frac{a/h}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \dots \dots \dots (3.38)$$

3.6 Hubungan Momen-Kelengkungan

Perilaku struktur yang mengalami lentur dapat diketahui dari hubungan momen-kelengkungan yang menggambarkan perilaku balok pada berbagai kondisi, yaitu saat kondisi elastis, leleh, elastis-plastis dan plastis. Gambar 3.13 adalah sebuah balok sederhana dengan penampang I yang menerima beban terpusat P .

Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi.



Gambar 3.13 Deformasi segmen balok dalam lenturan

Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi.

Elemen differensial balok untuk lentur murni ditunjukkan pada Gambar 3.13. Sumbu u dan v pada potongan melintang, adalah sumbu utama yang ditunjukkan pada Gambar 3.13b. AB adalah garis netral, pada garis netral ini garis tidak memendek ataupun memanjang.

Regangan pada garis netral didapatkan dari persamaan :

$$\epsilon_x = \frac{\text{panjang akhir} - \text{panjang awal}}{\text{panjang awal}} \dots\dots\dots (3.39)$$

dengan substitusi didapat :

$$\epsilon_x = \frac{(\rho + v)d\theta - \rho.d\theta}{\rho.d\theta} = \frac{v}{\rho} \dots\dots\dots (3.40)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dengan regangan linier, didapat :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{\varepsilon_x}{v} \dots\dots\dots (3.41)$$

Karena sifat beban tidak diperhitungkan maka hubungan ini digunakan untuk masalah-masalah elastis maupun tidak.

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \dots\dots\dots (3.42)$$

sehingga :

$$\varepsilon_x = \frac{Muv}{Elu} \dots\dots\dots (3.43)$$

Substitusi Persamaan 3.41 ke Persamaan 3.42 akan diperoleh :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{Mu}{Elu} \dots\dots\dots (3.44)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = k = \frac{\pm d^2v/dx^2}{[1+(dv/dx)^2]^{3/2}} \dots\dots\dots (3.45)$$

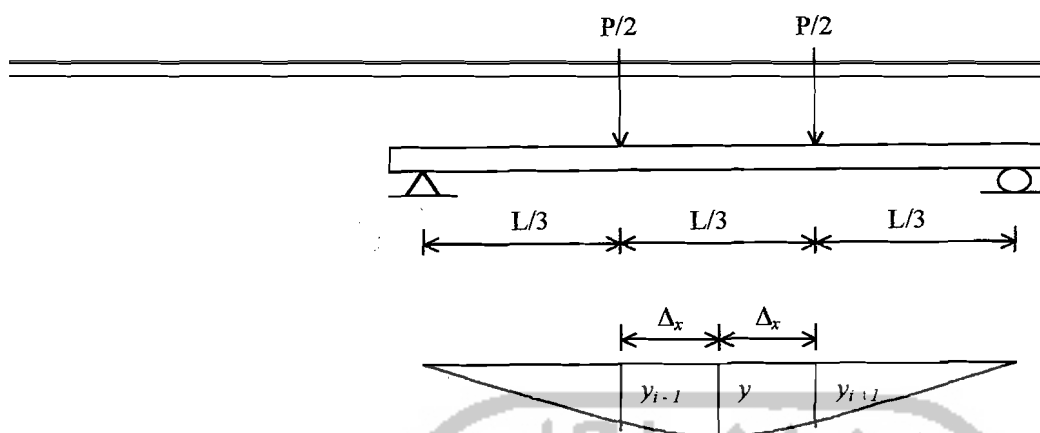
karena kemiringan dv/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka :

$$(dv/dx)^2 \approx 0 \dots\dots\dots (3.46)$$

Persamaan 3.41 disubstitusi dengan Persamaan 3.43 menjadi :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{El_u} \dots\dots\dots (3.47)$$

$$El_u = \frac{M}{(d^2v/dx^2)} \dots\dots\dots (3.48)$$



Gambar 3.14 Momen-kelengkungan

Dari pengujian kuat lentur diperoleh defleksi pada titik-titik distrik. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Difference*. Mengacu pada Gambar 3.14 dy/dx didekati dengan Persamaan 3.49.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta_x} \dots\dots\dots (3.49)$$

turunan kedua dari Persamaan 3.49 adalah :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx} (y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_{i+1} - y_{i-1}) \frac{d}{dx} (2\Delta_x)}{(2\Delta_x)^2} \dots\dots\dots (3.50)$$

karena $(2\Delta_x)$ adalah konstanta maka :

$$\frac{d}{dx} (2\Delta_x) = 0 \dots\dots\dots (3.51)$$

sehingga Persamaan 3.52 menjadi :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(2\Delta_x) \frac{d}{dx} (y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \dots\dots\dots (3.52)$$

selanjutnya dari Persamaan 3.52 didapatkan :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+2} - 2y_i - y_{i-2}}{(2\Delta_x)^2} \dots (3.53)$$

kemudian persamaan 3.53 disederhanakan menjadi :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \dots (3.54)$$

dengan :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \Phi = \frac{M}{EI} \dots (3.55)$$

$$M = EI \cdot \Phi \dots (3.56)$$

Mengacu kepada Gambar 3.14 didapat momen (M) :

$$M = \frac{1}{6} PL \dots (3.57)$$

Dengan menganggap stabilitas lateral sayap tekan memadai, perencanaan balok didasarkan pada pencapaian kekuatan lentur penampang maksimum. Distribusi tegangan pada profil sayap lebar tipikal yang mengalami momen lentur yang semakin besar diperlihatkan pada Gambar 3.4. Kekakuan ini didasarkan pada bahan yang tetap elastis sampai titik leleh tercapai, setelah itu tambahan regangan tidak menimbulkan kenaikan tegangan. Pada saat tegangan leleh (F_y) tercapai diserat terluar (S_x) kapasitas momennya disebut momen leleh (M_y) dan dapat dihitung sebagai :

$$M_y = F_y \cdot S_x \dots (3.58)$$

Bila penampang berada dalam kondisi plastis, regangan pada setiap serat sama dengan atau lebih besar dari $\epsilon_y = F_y/E_y$, dengan kata lain serat berada pada daerah plastis. Besarnya momen plastis yaitu dimana seluruh serat berada pada

daerah plastis. Kapasitas momen disebut momen plastis (M_p) dan besarnya :

$$M_p = f_b \int y.dA \dots\dots\dots (3.59)$$

$z = \int y.dA$ maka :

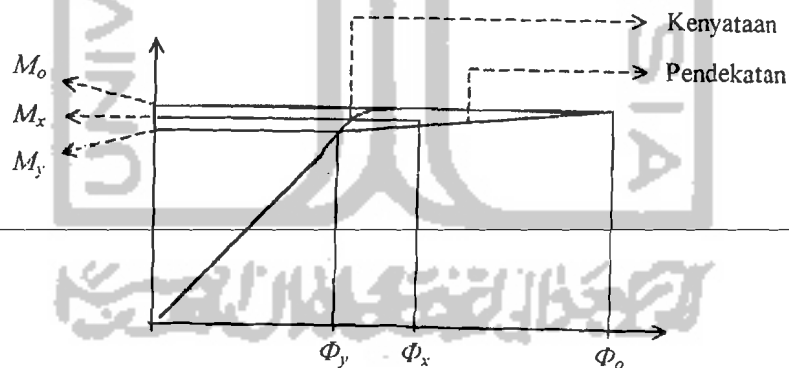
$$M_p = f_b.z \dots\dots\dots (3.60)$$

$z =$ modulus plastis.

Terlihat bahwa rasio M_p/M_y adalah sifat bentuk penampang lintang dan tidak bergantung pada sifat bahan. Rasio ini disebut faktor bentuk f .

$$f = \frac{M_p}{M_y} = \frac{z}{S} \dots\dots\dots (3.61)$$

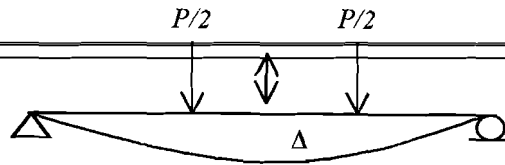
Hubungan Momen (M) dengan kelengkungan (Φ) ditunjukkan pada Gambar 3.15.



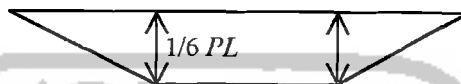
Gambar 3.15 Grafik momen-kelengkungan

3.7 Hubungan Beban-Lendutan

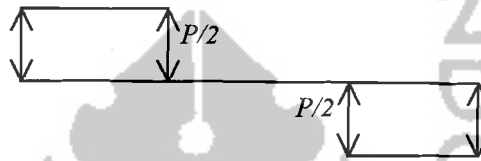
Lynn S. Beedle (1958) menyimpulkan bahwa balok dukungan sederhana yang diberi beban memiliki satu titik yang momennya maksimum. Makin besar beban yang diberikan, makin besar pula momennya. Jika beban besar, material akan terdeformasi semakin cepat dan defleksinya juga semakin besar.



Gambar 3.16 Lendutan balok



Gambar 3.17 Diagram Momen



Gambar 3.18 Diagram geser

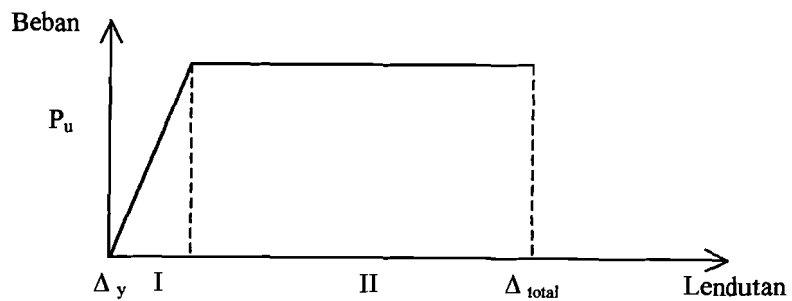
Hubungan beban-lendutan ditunjukkan :

$$\Delta = \frac{23P.L^3}{648EI} \dots \dots \dots (3.62)$$

\$\Delta\$ = defleksi balok, \$P\$ = beban balok, \$E\$ = modulus elastis bahan,

\$L\$ = panjang bentang balok, \$I\$ = momen inersia penampang

Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur dapat disederhanakan menjadi bentuk bi-linier (Popov) seperti pada Gambar 3.19.



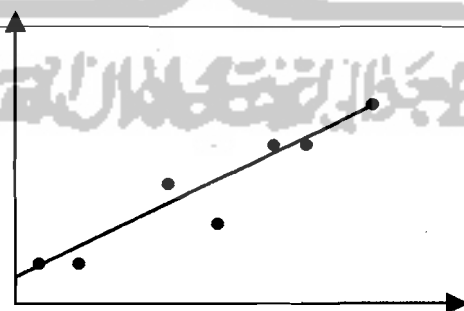
Gambar 3.19 Hubungan beban dan lendutan pada balok

3.8 Analisis Regresi

Untuk mengolah data yang didapat dari pengujian laboratorium digunakan bantuan analisis numerik dalam hal ini adalah analisis regresi. Biasanya data hasil pengujian disajikan dalam bentuk diskret atau tabel. Dari data tersebut ada dua hal yang diharapkan, yaitu : mencari bentuk kurva yang dapat mewakili data diskret tersebut, dan mengestimasi nilai data tersebut pada titik-titik diantara nilai-nilai yang diketahui. Analisis ini disebut sebagai *curve fitting*.

Ada dua metode pendekatan didalam *curve fitting* yang didasarkan pada jumlah kesalahan yang terjadi pada data, yaitu : regresi kuadrat terkecil dan interpolasi. Untuk menganalisis data dalam penelitian ini digunakan metode analisis regresi kuadrat terkecil.

Gambar 3.20 menunjukkan sket kurva yang dibuat dari data yang sama dengan regresi kuadrat terkecil. Kurva pada gambar 3.20 tidak melalui semua titik pengukuran tetapi hanya mengikuti model dari data menurut garis lurus.



Gambar 3.20 Analisis Regresi