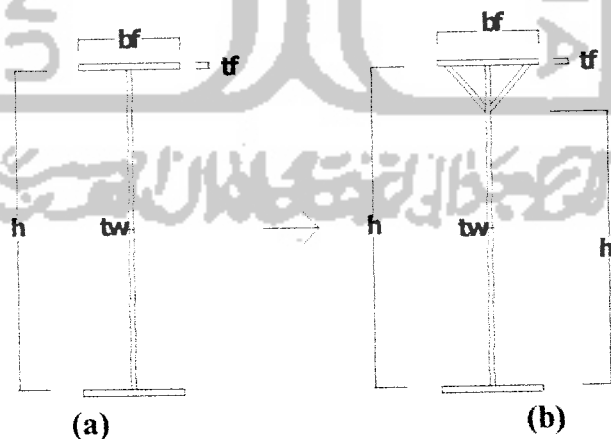


BAB III
LANDASAN TEORI

3.1. Gelagar Pelat

Gelagar pelat penampang ∇ (*∇ -Shape*) dibuat dari elemen-elemen pelat yang didesain dari dua sayap (atas dan bawah) dan satu pelat badan seperti profil I yang ditambah pengaku badan dan sayap tekan, sehingga mempunyai kekuatan lebih besar dibanding dengan gelagar pelat penampang I. Kuat lentur gelagar pelat biasanya dibatasi oleh tekuk, yaitu tekuk lokal dan tekuk puntir lateral. Tekuk lokal merupakan hasil dari rasio lebar terhadap tebal (b/t) dan (h/t), sedang tekuk puntir lateral merupakan rasio dari L_b/r_t . Semakin besar b/t dan h/t , maka tegangan kritis (F_{cr}) meningkat, dan semakin besar L/r_y , maka momen kritis (M_{cr}) semakin besar.



Gambar 3.1 (a) Gelagar pelat penampang I dan (b) penampang ∇

3.2. Tegangan Kritis Plat

Persamaan differensial untuk lenturan plat homogen yang dikemukakan oleh Timoshenko (1959) yang ditunjukkan pada persamaan 3.1

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

dengan : w = lendutan lateral, q = komponen beban transversal akibat lenturan pelat, D = kekakuan lentur persatuan panjang pelat. Solusi persamaan 3.1 menghasilkan persamaan 3.2, yaitu :

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$F_{cr} = \frac{Mn.y}{I} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$k = \frac{12(1-\mu^2)(h/t)^2}{\pi^2 E}, \text{ untuk badan} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$k = \frac{12(1-\mu^2)(b/t)^2}{\pi^2 E}, \text{ untuk sayap} \dots \dots \dots (3.5)$$

dengan: k = koefisien tekuk pelat, μ = poisson rasio, b = lebar pelat, t = tebal pelat.

$$k = \left[\frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \dots \dots \dots (3.6)$$

Dari persamaan diatas, untuk mencari Momen kritis girder maka tegangan kritis sayap dikali dengan tinggi gelagar dikurangi tebal flens untuk sayap, sedang

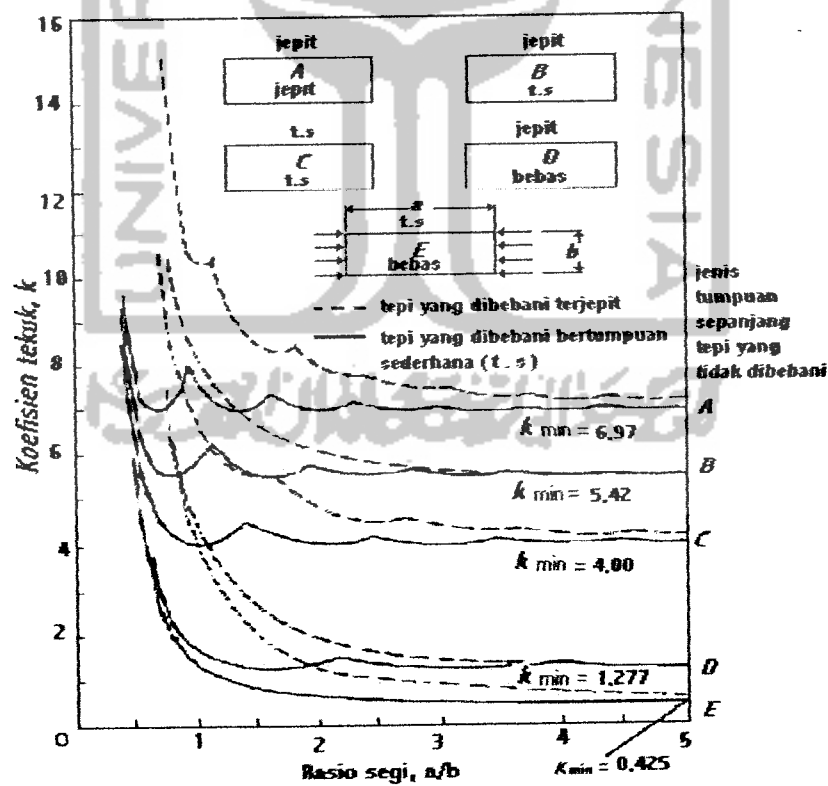
untuk badan tegangan kritis badan dikali tinggi gelagar dikurangi tebal flens kuadrat dikali 1/6 tebal badan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$M_{cr \text{ girder}} = M_{cr \text{ flens}} + M_{cr \text{ web}} \quad (3.7)$$

$$M_{cr \text{ girder}} = [F_{cr \text{ flens}}(h - t_f)] + \left[F_{cr \text{ web}} \left(\frac{1}{6} \right) t_w (h - t_f)^2 \right] \quad (3.8)$$

3.2.1. Pelat memikul Tekanan Merata

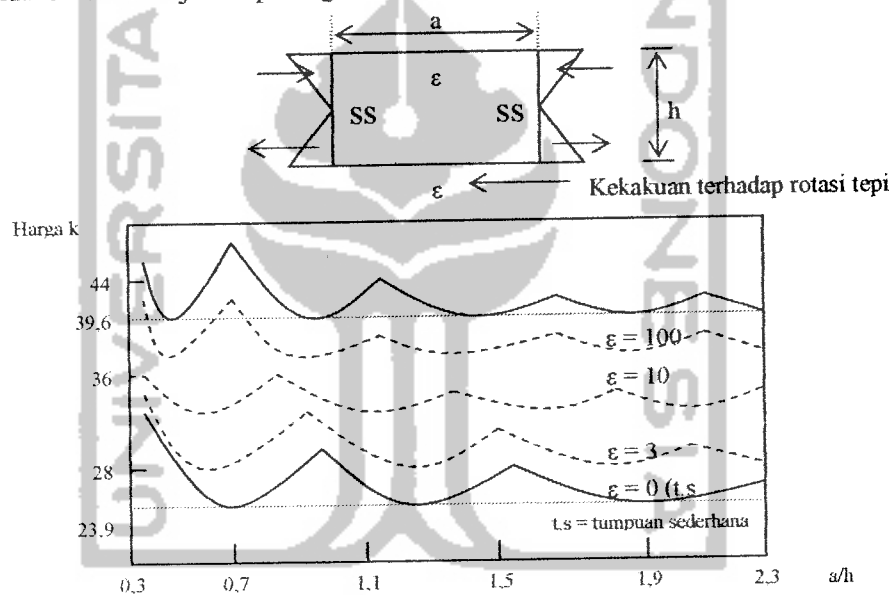
Nilai k untuk pelat yang memikul tekan merata dengan berbagai kondisi tepi (jepit, bebas, dan tumpuan sederhana) ditunjukkan gambar 3.2



Tampak variasi nilai koefisien tekuk k terhadap aspek rasio a/b dan kondisi tepi pelat pada berbagai jenis tumpuan pelat. Pada pelat dengan tumpuan jepit-jepit (grafik A) $k_{\min} = 6,97$; untuk jepit-sendi (grafik B) $k_{\min} = 5,42$; untuk sendi-sendi (grafik C) $k_{\min} = 4,00$; untuk jepit- bebas (grafik D) $k_{\min} = 1,277$; untuk sendi bebas (grafik E) $k_{\min} = 0,425$.

3.2.2. Pelat memikul Lentur

Untuk pelat-pelat yang memikul lentur. Koefisien tekuk pelat-pelat yang memikul lentur ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Koefisien tekuk untuk plat yang mengalami lentur murni (dari Handbook of Structural Stability, Vol. 1 [6.69](p.92))

Pada Gambar 3.3. nilai k bervariasi menurut rasio a/h , jika pelat bisa dianggap jepit sempurna sepanjang tepi yang sejajar arah pembebanan maka harga k minimum untuk sembarang rasio a/h menjadi 39,6, sedangkan sayap dianggap tidak mengekang secara rotasi tepi maka harga k minimum menjadi 23,9. Nilai k

teoritis lentur yang digunakan dalam penelitian ini adalah 23,9 dari berbagai benda uji dengan rasio a/h bervariasi yaitu 12, 9,6 dan 8

3.2.3. Pelat Memikul Geser

Untuk perencanaan, Persamaan 3.2 dan 3.6 biasanya dinyatakan dalam h (tinggi badan tanpa sokongan) dan a (jarak antara pengaku). jika kita hendak memakai h/t sebagai rasio stabilitas pada penyebut, maka persamaan untuk k diperlukan. Untuk semua harga a/h , Persamaan bisa dituliskan sebagai :

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.9)$$

dengan :

$$k = 4,0 + 5,34/(a/h)^2, \text{ untuk } a/h \leq 1 \quad (3.10)$$

$$k = 4,0/(a/h)^2 + 5,34, \text{ untuk } a/h \geq 1 \quad (3.11)$$

Tampak pada Persamaan 3.8 dan 3.9 bila a/h semakin kecil maka nilai k akan semakin besar.

Persamaan 3.7 ditulis dalam bentuk tanpa hubungan dimensi, yaitu rasio tegangan geser kritis terhadap tegangan leleh geser,

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 Ek}{(12)(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.12)$$

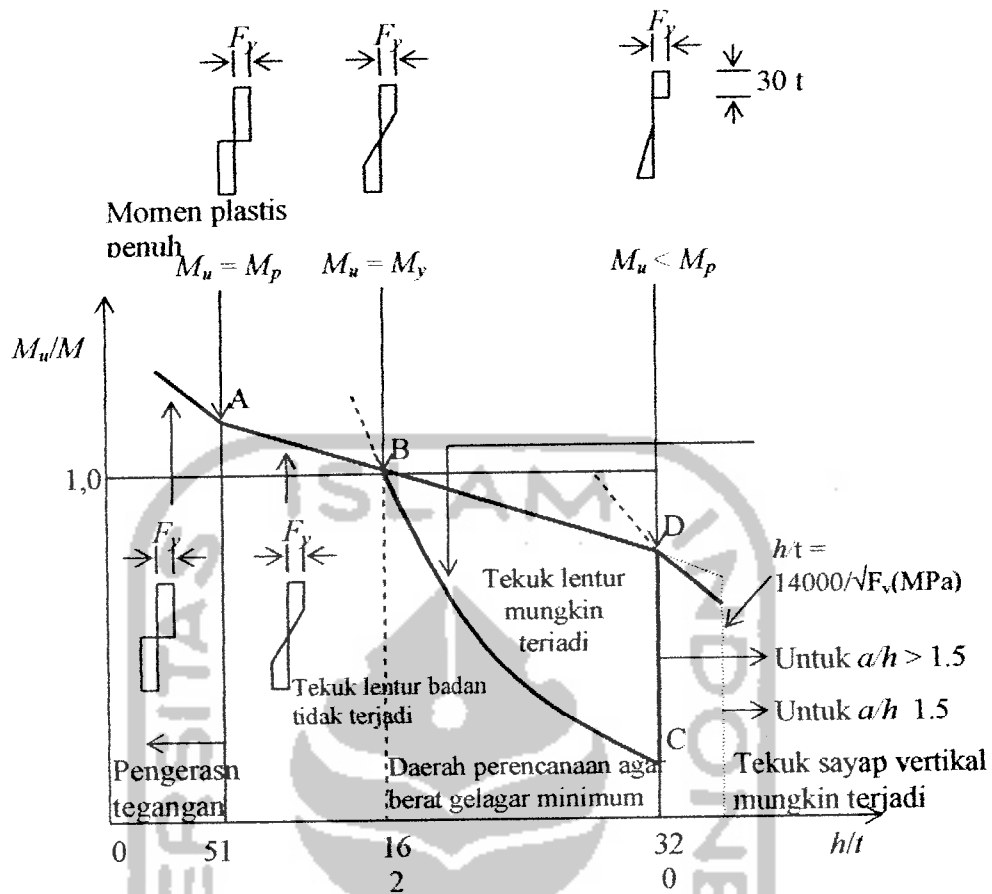
3.3. Kapasitas Lentur Gelagar Pelat

Berdasarkan penelitian oleh **Salmon and Johnson (1996)** dengan bahan penelitiannya adalah baja profil I dengan mutu baja A36, badan akan tertekuk akibat adanya tegangan lentur.

$$M_u = f \left\{ \frac{h}{t_w}, \frac{L}{r_y}, \frac{b}{t_f}, \frac{A_w}{A_f} \right\} \quad (3.13)$$

dengan h/t_w adalah menentukan ketidakstabilan badan (tekuk lentur), L/r_y adalah menentukan ketidakstabilan lateral pada sayap (tekuk puntir lateral), b/t_f adalah menentukan tekuk setempat (tekuk puntir) pada sayap, A_w/A_f adalah menentukan pengaruh purna tekuk badan pada sayap. Kapasitas lentur pada gelagar pelat tanpa pengaku cenderung mengalami tekuk lentur pada rasio $h/t_w=162$, selanjutnya akan terjadi penurunan kapasitas lentur gelagar. Apabila h/t_w besar (daerah perencanaan agar berat gelagar minimum, h/t 162 s/d 320) tegangan kritis yang terjadi relatif kecil, sehingga dapat menimbulkan tekuk kritis dan mencegah terjadinya tekuk (buckling) pada pelat badan (Web). Tegangan kritis pelat akan meningkat bila pengaku vertikal dan horisontal diberikan pada badan gelagar. Pada gelagar tanpa pengaku terjadi penurunan grafik secara drastis ini berarti tekuk lentur mungkin terjadi. Daerah perencanaan agar berat gelagar minimum pada daerah B-D, bila perencanaan pada daerah area A-B akan diperoleh gelagar yang kuat terhadap tekuk lentur badan.

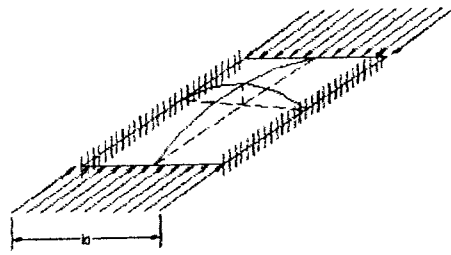
Dengan demikian kapasitas lentur gelagar serta kekuatan purna tekuk gelagar akan meningkat.



Gambar 3.4 Kekuatan lentur gelagar yang dipengaruhi oleh tegangan lentur pada plat badan : baja A36 (Salmon dan Johnson, 1996)

3.4. Tekuk pada Sayap

Gambar 3.5 merupakan elemen pelat yang diperkuat, yang bertumpu sepanjang dua tepi yang sejajar pembebanan. Untuk tumpuan jepit-jepit (Grafik 3.1) $k_{min} = 6,97$; Untuk mencegah terjadinya tekuk pelat pada sayap maka nilai $f_c < F_{cr}$.



Gambar 3.5. Defleksi tekuk pelat pada sayap (jepit-jepit).
(dari Salmon dan Johnson,1992)

Persamaan (3.14) tegangan mencegah flens tekan mengalami tekuk vertikal

$$f_c = \frac{\sigma_f A_f d\theta}{t_w dx} = \frac{2\sigma_f A_f \epsilon_f}{t_w h} \quad (3.14)$$

Persamaan (3.11) disamakan dengan tegangan tekuk elastis akan diperoleh

$$\frac{h}{t_w} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{24(1-\mu^2)} \left(\frac{A_w}{A_f}\right) \left(\frac{1}{\sigma_f \epsilon_f}\right)} \quad (3.15)$$

h/t_w dipengaruhi oleh luas badan (A_w), luas sayap (A_f), tegangan sayap (σ_f), regangan sayap (ϵ_f). Apabila A_f , σ_f , ϵ_f kecil, maka akan diperoleh h/t_w besar. Sedangkan bila A_w besar maka akan diperoleh h/t_w besar (pelat badan ramping)

3.5. Tekuk Pada Bidang Badan

3.5.1. Tekuk Pada Badan Akibat Lentur

Untuk lentur pada bidang plat dijabarkan oleh Timoshenko dan Kriger (1959), tegangan kritis (dengan $E = 200\,000$ MPa) bisa dikatakan terletak antara :

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

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

maka pilih harga k yang lebih dekat dengan 39.6, misal 80 persen dari perbedaan terhadap harga yang lebih tinggi. Dapat kita katakan bahwa ,

$$F_{cr} = \frac{5696000}{(h/t_w)^2} MPa \quad (3.16)$$

Tekuk lentur semacam ini tidak akan terjadi bila,

$$\frac{h}{t_w} \leq \sqrt{\frac{5696000}{F_{cr, MPa}}} = \frac{2387}{\sqrt{F_{cr}}} \quad (3.17)$$

3.5.2. Tekuk Pada Badan Akibat Geser

a. Tekuk Elastis Akibat Geser Murni

Menurut **Salmon dan Johnson (1986)**, Untuk kasus geser murni bisa dituliskan sebagai (dengan mengganti F dengan τ untuk tegangan geser)

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{\text{sisipendek}}{t} \right)^2} \quad (3.18)$$

Untuk kasus tepi bertumpuan sederhana (yakni perpindahan dicegah tetapi rotasi terhadap tepi tidak dikekang),

$$k = 5,34 + 4,0 \left(\frac{\text{sisipendek}}{\text{sisipanjang}} \right)^2 \quad (3.19)$$

dengan

$$k = 4,0 + 5,34/(a/h)^2, \text{ untuk } a/h \leq 1 \quad (3.20)$$

$$k = 4,0/(a/h)^2 + 5,34, \text{ untuk } a/h \geq 1 \quad (3.21)$$

Dari persamaan 3.16 dan 3.19 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 3.16 ditulis dalam bentuk tanpa dimensi, dengan mendefinisikan koefisien C_v sebagai rasio antara tegangan geser pada saat tertekuk dan tegangan leleh geser,

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{(12)(1 - \mu^2)(h/t)^2} \quad (3.22)$$

b. Tekuk Inelastis Akibat Geser Murni

Sebagaimana dalam situasi stabilitas, tegangan sisa dan ketaksempurnaan (*imperfection*) mengakibatkan tekuk tak elastik pada saat tegangan kritis mendekati tegangan leleh.

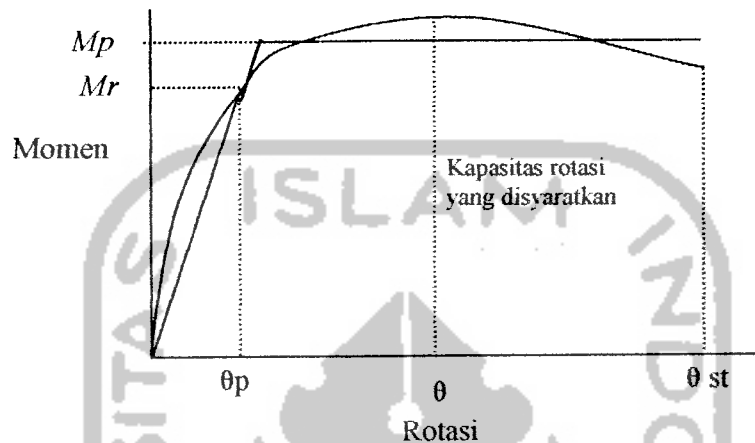
$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_p \cdot \tau_{cr(\text{elastikide al})}} \quad (3.23)$$

Batas proporsional diambil sebagai $0,8 \tau_y$, yang lebih besar daripada untuk tekan dalam flens, karena efek tegangan sisa lebih sedikit. Pembagian Persamaan 3.22 dengan τ_y untuk mendapatkan C_v dan tegangan menggunakan Persamaan 3.21 memberikan

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{491}{h/t_w} \sqrt{\frac{k}{F_{yw}}} \quad (3.24)$$

3.6. Tekuk Puntir (*Torsional Buckling*)

Tekuk puntir merupakan suatu keadaan batas yang mungkin yang dapat mengontrol kekuatan suatu balok. Terdapat tiga kategori perilaku yang diwakili dalam gambar 3.6



Gambar 3.6 Hubungan momen - rotasi (Salmon dan Johnson, 1996)

- Kekuatan momen plastis M_p tercapai dan kemampuan deformasi yang besar.
- Perilaku tak-elastis dimana kekuatan momen dipengaruhi oleh tegangan sisa dan mungkin tidak tercapai M_p .
- Perilaku elastis dimana kekuatan momen dikontrol oleh tekuk elastis; tekuk flens lokal, tekuk badan balok, atau tekuk puntir lateral.

3.6.1. Tekuk Puntir-Lateral Elastis

Pada suatu balok dalam posisi tertekuk, momen yang terjadi (M_0) akan meningkatkan komponen momen M_x , M_y , dan M_z , maka akan terdapat kurvatur lentur dan puntir.

$$EI \frac{d^2 v}{dz^2} = M = M_0 \quad (3.25)$$

Dimana v adalah displasemen sentroid, penyelesaian untuk $M_0 = M_{cr}$ memberikan persamaan merupakan kekuatan tekuk puntir-lateral elastis untuk penampang profil-I yang terkena momen konstan pada bidang badan balok pada panjang yang secara lateral tidak berpenopang L . Untuk menyesuaikan gradien momen, Persamaan 3.24 dapat dikalikan dengan suatu faktor C_b . Dengan demikian secara umum:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 C_w I_y + EI_y GJ} \quad (3.26)$$

3.6.2. Tekuk Puntir-Lateral Tak Elastis

Untuk memperoleh kekuatan dan kapasitas rotasi, kita dapat menggunakan persamaan tekuk puntir-lateral elastis.

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E}{L^2} \sqrt{C_w I_y} \quad (3.27)$$

Karena M_{cr} harus mencapai M_p , substitusikan $M_p = Z_x f_y$ untuk M_{cr} . Demikian pula $C_w = I_y b^2/4$, $I_y = Ar^2$, Dan gantikan L dengan L_b untuk panjang yang tidak berpenopang lateral. Bila diselesaikan akan diperoleh rasio kerampingan maksimum.

$$\frac{L_b}{r_y} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2 f_y} \left(\frac{hA}{Z_x}\right)} \quad (3.28)$$

3.7. Kekuatan Geser Nominal – Termasuk Aksi Medan Tarik

Menurut **Salmon dan Johnson (1996)**, kekuatan geser nominal V_n dari suatu gelagar berdasarkan tekuk tak-elstik atau elastik badan dapat dinyatakan

$$V_n = \tau_{cr} A_w \quad (3.29)$$

atau dengan menggunakan $C_v = \tau_{cr} / \tau_y$ maka

$$V_n = C_v \tau_y A_w \quad (3.30)$$

jika $\tau_y = 0.6F_y$ dan $C_v = 1$ maka

$$V_n = (0.6F_y) A_w \quad (3.31)$$

Kekuatan Geser dalam Rentang Beban Layanan

$$\left(\frac{V_n}{\gamma / \phi} = \frac{V_n}{FS} \right) \geq V \quad (3.32)$$

dimana: γ / ϕ = faktor-faktor kelebihan beban dibagi oleh faktor resistansi

$FS = 1.67$ = faktor keamanan nominal dalam desain balok

V = geser beban layanan

3.8. Hubungan Beban-Lendutan

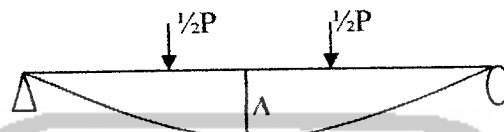
Hubungan beban-lendutan untuk tipe pembebanan seperti Gambar 3.10 seperti yang di tulis oleh **Krigger dan Timoshenko (1997)**,

$$\Delta = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.33)$$

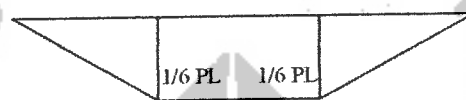
Rumus kekakuan (k) yaitu :

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (3.34)$$

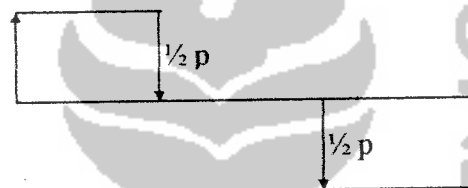
Dimana : k = kekakuan (kN/mm), P = beban (kN), Δ = lendutan (mm)



Gambar 3.7 Lendutan balok

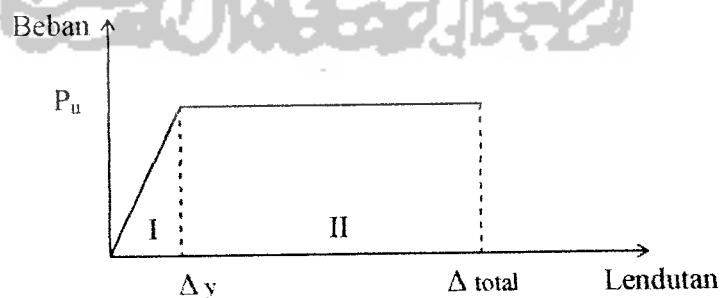


Gambar 3.8 Diagram momen



Gambar 3.9 Diagram geser

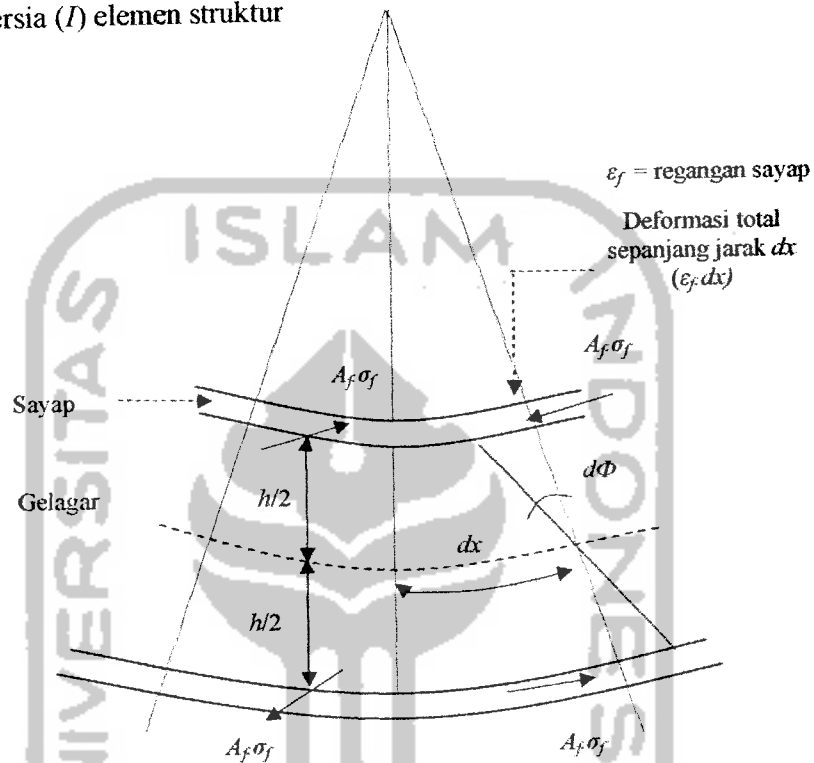
dengan : Δ = defleksi balok, P = beban balok, E = modulus elastis bahan, L = panjang bentang balok, I = momen inersia penampang, a = jarak beban dari dukungan. Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur dapat disederhanakan menjadi bentuk bi-linier seperti pada Gambar 3.10



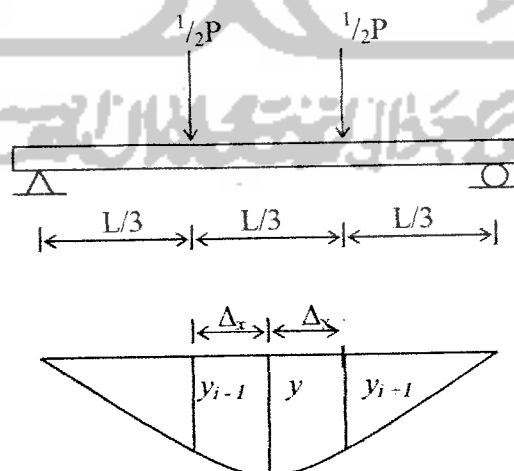
Gambar 3.10 Hubungan Beban dan Lendutan pada Balok

3.9. Hubungan Momen-Kelengkungan

Kelengkungan ($1/\rho$) berbanding lurus dengan momen (M) pada elemen struktur dan berbanding terbalik dengan hasil kali modulus elastisitas (E) dan momen inersia (I) elemen struktur



Gambar 3.11 Gaya sayap akibat lengkungan gelagar (Salmon dan Johnson, 1996)



Gambar 3.12 Momen-kelengkungan

Mengacu pada gambar 3.11 dy/dx dicari dengan persamaan :

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.35)$$

karena $(2\Delta x)$ adalah konstanta maka;

$$\frac{d}{d_x}(2\Delta x) = 0 \quad (3.36)$$

Kemudian persamaan disederhanakan menjadi :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \quad (3.37)$$

Persamaan 3.36 digunakan dalam penelitian ini karena lebih sederhana dan tidak memerlukan peralatan khusus.

$$\frac{d^2 y}{d_x^2} = \Phi = \frac{M}{EI} \quad (3.38)$$

Mengacu kepada Gambar 3.8 didapat momen (M) :

$$M = \frac{1}{6} p l \quad (3.39)$$

Sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus :

$$EI = \frac{M}{\Phi} \quad (3.40)$$

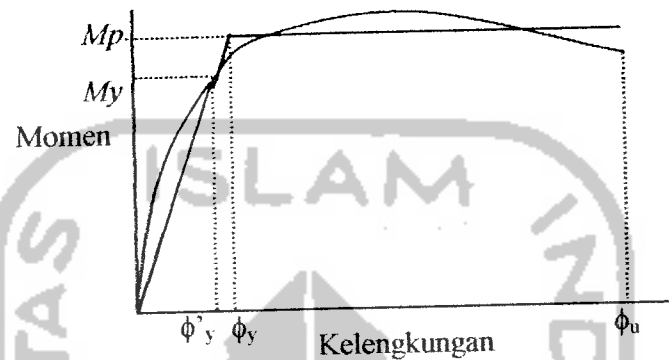
$$M = EI \cdot \Phi \quad (3.41)$$

$$M_n / M_y = \frac{F_{cr} \cdot S_x}{F_y \cdot S_x} \quad (3.42)$$

jika $f = (\sigma)$ maka persamaan untuk kelengkungan yang mendekati adalah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.43)$$

$$\phi = \frac{\varepsilon}{h/2} \quad (3.44)$$



Gambar 3.13 Grafik momen kelengkungan

3.10. Daktilitas

Kelakuan inelastis yang daktil bisa meningkatkan beban yang mampu dipikul batang dibanding dengan beban yang ditahan jika suatu struktur tetap dalam keadaan elastis. Bila seluruh tinggi balok meleleh, diperoleh batas atas dari kekuatan momen yang disebut kekuatan plastis. Proses pembebanan di luar daerah elastis akan menyebabkan perubahan pada daktilitasnya, sedangkan daktilitas itu sendiri dirumuskan :

$$Daktilitas = \frac{\varepsilon_{tot}}{\varepsilon_y} \quad (3.45)$$

dengan : ε_{tot} = regangan total, ε_y = regangan pada saat leleh pertama

3.11. Perhitungan Inersia Secara Teoritis

Secara teoritis dengan menggunakan persamaan untuk mencari inersia dari gelagar I yaitu :

$$I_x = \int y^2 \cdot dA \quad (3.46)$$

Integral dari persamaan 3.46 diperoleh hasil persamaan 3.47

$$I_x = \left(\frac{1}{12} \right) BH^3 \quad (3.47)$$

Untuk inersia dari suatu profil, maka inersia (I_x) elemen suatu profil pada persamaan 3.47 ditambah luas elemen dikali jarak titik berat elemen dengan titik berat profil, seperti terlihat pada persamaan 3.48

$$I_x = \left(\frac{1}{12} \right) BH^3 + (A \cdot y^2) \quad (3.48)$$

Dimana : I_x = Inersia terhadap sumbu x, B = lebar elemen yang ditinjau

H = Tinggi elemen yang ditinjau, A = Luas elemen yang ditinjau

y = Jarak titik berat elemen terhadap titik berat profil.

Dari persamaan diatas dengan menggunakan persamaan 3.46 diperoleh inersia (I_x) untuk gelagar I = 42987733,33 mm^4 , sedang untuk gelagar ∇ diperoleh inersia (I_x) = 45223494,528 mm^4 , sesuai dengan perhitungan pada lampiran 3, diperoleh rasio Inersia (I_x) gelagar $\nabla / I = 1,05$.

3.12. Perhitungan Beban Secara Teoritis Berdasarkan Tegangan Geser

Gaya geser yang dapat dipikul oleh badan pada gelagar dapat dihitung melalui persamaan 3.29 yaitu :

$$V_n = \tau_{cr} A_w \quad (3.29)$$

Untuk mencari τ_{cr} menggunakan persamaan 3.22, yaitu

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 Ek}{(12)(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad (3.22)$$

Dari persamaan diatas diperoleh τ_{cr} gelagar I = 25,26 N/mm², sedang untuk τ_{cr} gelagar ∇ = 204,8 N/mm². Rasio dari τ_{cr} gelagar I / τ_{cr} gelagar ∇ adalah 0.1233. atau dengan penambahan elemen berbentuk ∇ pada gelagar I meningkatkan nilai τ_{cr} sebesar 8.108 kali. Hasil perhitungan lengkapnya dapat dilihat pada lampiran 3 halaman 9-11.

3.13. Hipotesis

Penambahan elemen ∇ pada gelagar pelat penampang I akan meningkatkan momen inersia gelagar I dan memperkecil nilai h sehingga kapasitas lentur dan kapasitas geser gelagar pelat penampang ∇ lebih besar dari gelagar pelat penampang I dan koefisien tekuk (k) gelagar pelat penampang ∇ lebih besar dari gelagar pelat penampang I, selain itu nilai L/rt akan meningkat sehingga momen kritis (M_{cr}) gelagar pelat penampang ∇ lebih besar dari gelagar pelat penampang I.