

Diktat Kuliah Struktur Baja II

Oleh: Ir.Sanci Barus,MT,IPM

Struktur Baja II melingkupi materi :

- I Pendahuluan
- II Sambungan dengan alat sambung Las (Welding)
 - Teknologi Las & Macam macam Las
 - Sambungan dengan Las Tumpul
 - Sambungan dengan Las Sudut
 - Aplikasi Sambungan dengan alat sambung las
 - Memikul gaya aksial
 - Memikul gaya Momen
 - Memikul Gaya Lintang
 - Memikul M,D, & Normal
- III Perencanaan Gelagar Baja I atau Plat Girder
 - Perhitungan Gaya gaya
 - Dimensi Gelagar dengan metode ASD & LRFD
 - Kontrol Geser
 - Kontrol KIP
 - Kontrol Lendutan
- IV Pengaruh Tekuk Local (Local Buckling)
 - Pada Flens (Sayap)
 - Pada Web (Badan)
- V Perencanaan Sendi Engsel Pada Balok Gerber
- VI Industrial Building
 - Perencanaan Sambungan Balok Kolom
 - Perencanaan Bracing & Pengaku-pengaku
 - Ikatan-ikatan Angin

DII

Pendahuluan :

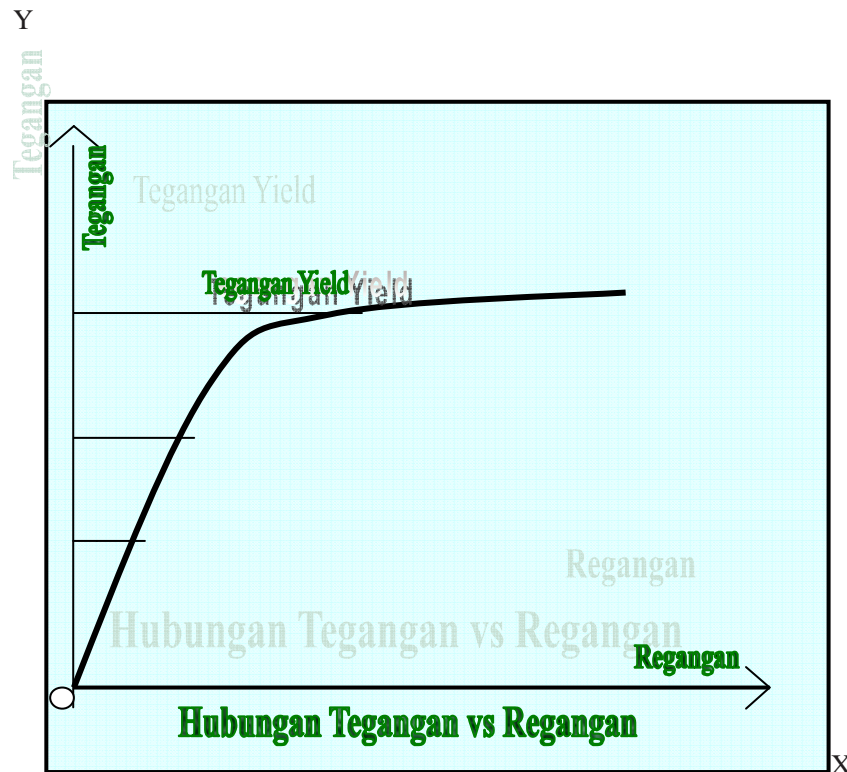
Perencanaan sambungan maupun perencanaan Gelagar kita kenal secara umum dengan cara Elastis yang diadopsi dari system perencanaan AISC (American Institute Steel Construction) yang dituangkan dalam system ASD (Allowable Stress Design). Yang dipopulerkan dan diakui keberadaannya dalam PBBI (Peraturan Bangunan Baja Indonesia 1982)

Saat sekarang telah diadopsi lagi peraturan yang lebih baru dengan metode Plastisitas dengan system lebih populer yaitu LRFD (Load Resistance Factor Design)

Didalam diktat perkuliahan Struktur Baja II ini, kita akan lebih memfokuskan kedalam system ASD yang sudah lebih populer dan lebih Familiar didalam lingkungan perkuliahan. Karena itu kita akan memperlihatkan dengan jelas secara umum dan lebih menuju kepada Filosofi tentang kedua system.

System perencanaan ASD lebih mengarah kepada Safety Faktor dalam tegangan rencana. Biasanya safety factor diambil kurang lebih 2/3.

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y}{1.5}$$



Dari hubungan Tegangan Regangan dapat dilihat maka tegangan izin yang dipergunakan untuk perencanaan (Design) dengan metode ASD = 2/3 bagian dari tegangan leleh yang terjadi.

Sytem dengan Metode LRFD, dipergunakan tegangan Leleh dengan memberikan coefficient Factor pada pembebanan dan pada kekuatan bahan (Strength of Material) antara lain kekuatan memikul Lentur, kekuatan memikul geser, dan kekuatan memikul aksial yang tergantung dari bentuk materialnya. Juga akibat perngaruh coificient pembebanan. Dengan kedua factor tersebut tentunya ketelitian perencanaan akan lebih accurate dibanding dengan cara metode elastis (ASD). Peraturan LRFD sudah ditulis oleh Lembaga Laboratorium Struktur PPAU Institut Teknologi Bandung. Juli 2000. Namun belum diundangkan secara resmi oleh Standar Indonesia.

III. Perencanaan Gelagar Baja I (Design)

Dgn System Metode LRFD (Metode Kekuatan Batas)

Kombinasi Pembebanan:

$$1.4 D$$

$$1.2 D + 1.6 L$$

Dimana : D = Beban mati (dead load)

L = Beban hidup (live load)

Design :

$$F_y = \frac{M_u}{\phi W}$$

Dimana : $\phi = 0.9$

F_y =Tegangan leleh baja

Pengaruh Kelangsingan Pada Balok I

$$\lambda = b/t_f \quad b = \text{Lebar sayap} \quad t_f = \text{tebal sayap}$$
$$\lambda_p = 170 / \sqrt{f_y} \quad \text{Untuk penampang kompak (Solid)}$$
$$\lambda_r = 370 / \sqrt{f_y - f_r} \quad \text{Untuk penampang tak kompak}$$

Pengaruh Lendutan :

$$Y_{\max} = \frac{L}{240}$$

Contoh Soal :

Suatu Gelagar Baja I Continiu memikul beban mati dan beban hidup P terpusat & q terbagi rata sbb: P= 10 ton, q berat sendiri (dead load) = 1 T/m', q beban gerak = 2 T/m' Tegangan leleh baja 2400 kg/cm².

Diminta : Design Gelagar Baja dan kontrole

Penyelesaian :

$$F_y = \frac{M_u}{\phi W}$$

$$M_u = (\frac{1}{4} PL + \frac{1}{8} q_{bg} L^2) 1.6 + (\frac{1}{8} q_{bs} L^2) 1.2$$

$$W_{\text{perlu}} \geq \frac{M_u}{0.9 f_y} \quad \text{dimana : } \phi = 0.9$$

$$M_u = (\frac{1}{4} \cdot 10.8 + \frac{1}{8} \cdot 2.0(8^2)) 1.6 + (\frac{1}{8} \cdot 1.0(8^2) 1.2$$

$$M_u = 67.2 \text{ Ton.m}$$

Diperoleh:

$$W_{\text{perlu}} \geq \frac{67.2(10^5)}{0.9(2.400)} = 3.111 \text{ Cm}^3$$

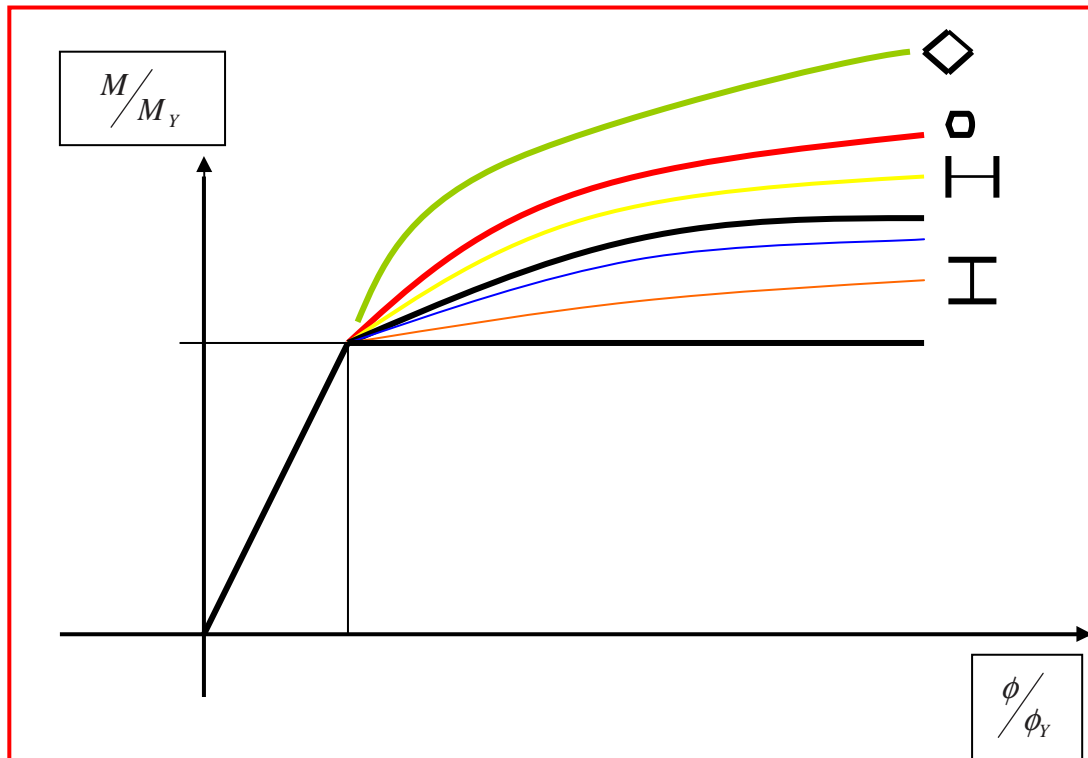
Metode Elastis :

$$M_{Elastis} = (\frac{1}{4}PL + \frac{1}{8}q_{bg}L^2) + (\frac{1}{8}q_{bs}L^2)$$

$$M_{Elastis} = 44 \text{ Ton.m}$$

Diperoleh :

$$W_{perlu} \geq \frac{44(10^5)}{1.600} = 2.750 \text{ Cm}^3$$



Grafik hubungan $\frac{M_p}{M_y}$ dan $\frac{\phi}{\phi_y}$

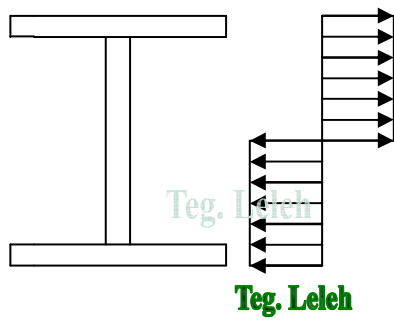
Dalam analisis LRFD, kuat lentur nominal Struktur Balok Baja dipengaruhi oleh beberapa kondisi batas yaitu :

1. Kondisi Batas leleh Penuh (Kondisi Plastis)
2. Kondisi Batas tekuk Lokal (Pelat Badan & Sayap) (Local Buckling)
3. Kondisi batas tekuk Torsi Lateral (Torsional Buckling)

KONDISI PLASTIS

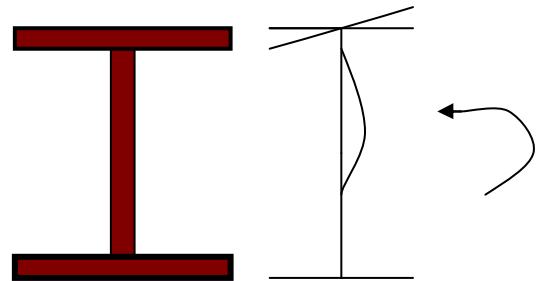
Seluruh bagian penampang mencapai leleh

dengan tegangan nominal leleh sebesar f_y

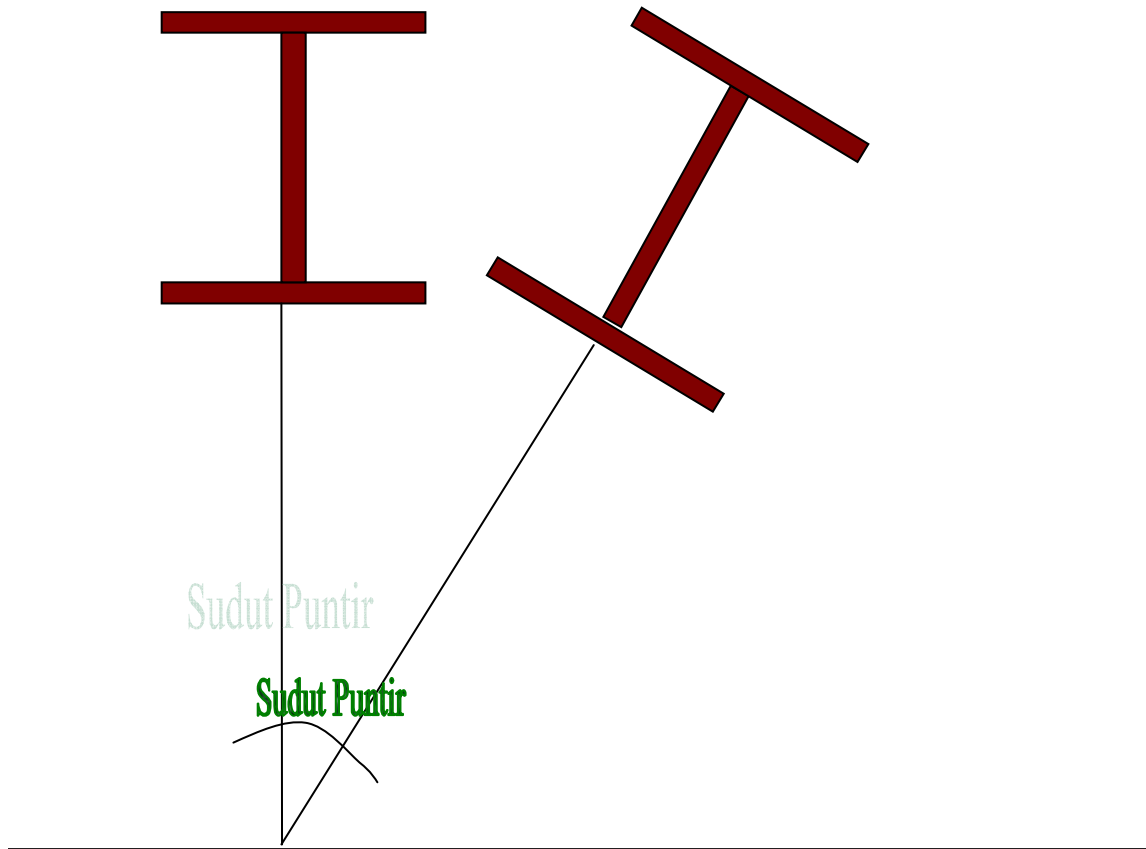


KONDISI LOCAL BUCKLING

Tekuk terjadi pada bagian pelat badan dan pelat sayap yang tertekan oleh gaya terkonsentrasi. Pada perletakan dan pada beban terpusat permanent.



KONDISI TORSIONAL BUCKLING



KONDISI BATAS PENAMPANG

Kelangsingan : λ

λ_p : Membatasi daerah Plastis dan Inelastic

λ_r : Membatasi daerah Inelastic Elastic

Dimana bila :

$0 < \lambda \leq \lambda_p$: Penampang kompak $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$: Penampang Tidak kompak $\lambda \geq \lambda_r$: Penampang lang sin g

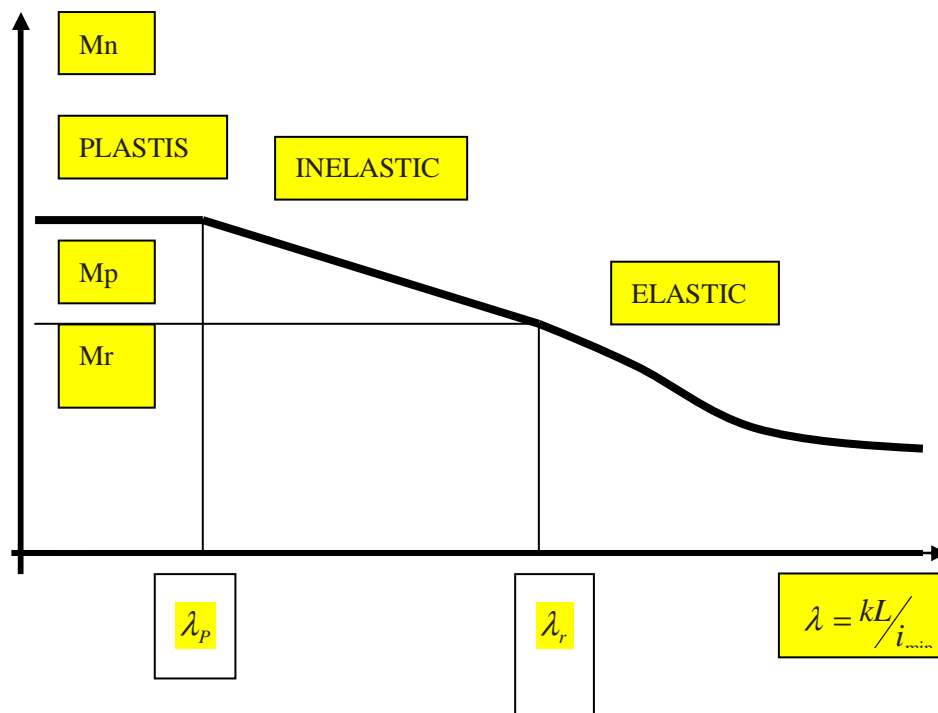
Plat sayap :

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} \quad \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} \quad \lambda_r = \frac{370}{\sqrt{(f_y - f_r)}}$$

Pelat Badan :

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad \lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \quad \lambda_r = \frac{2550}{\sqrt{f_y}}$$

Dimana : $h = d - (2t_f + 2r)$tinggi bersih badan profil



KONDISI PLASTIC $\lambda \leq \lambda_p$

Penampang Gelagar I direncanakan Runtuh setelah seluruh penampang mengalami leleh (Yeld)
dimana Momen maksimum sama dengan Momen Plastic

$$M_{\max} = M_p = Z_x \cdot f_y \leq 1.5 M_y$$

dimana : $Z_x = \sum A_i \cdot y_i$ (adalah modulus Plastic Penampang)

KONDISI TEKUK ELASTIC $\lambda \geq \lambda_r$

$$M_n = M_r \left(\frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r)$$

bila : f_r = tegangan sisa

f_y = tegangan leleh

KONDISI TEKUK INELASTIC

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$$

Diharapkan ketika sebagian penampang sudah elastis atau keadaan Inelastis, Balok akan mengalami runtuh akibat pengaruh tekukan.

Dapat didefinisikan Kuat Lentur Nominal sebesar :

$$M_n = \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda - \lambda_r} \right) \right]$$

KONDISI BATAS BALOK BAJA I DENGAN PENAMPANG KOMPAK

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$L_p = 1,76.i_y \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}} \quad (\text{Jari}^2 \text{ inertia})$$

L_p = Panjang bent. pengeangangan maksimum plastis

$$L_r = \left(\frac{i_y \cdot \pi}{S_x (f_y - f_r)} \right) \sqrt{\frac{EF \cdot GJ}{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4(f_y - f_r)^2 \frac{I_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2}}$$

I_w = Inertia warping

J = Inertia torsi St.Venant

L_r = Panjang bentan g pengeangangan terkecil lateral

BENTANG PENDEK (PLASTIC PENUH)

$$L_b \leq L_p$$

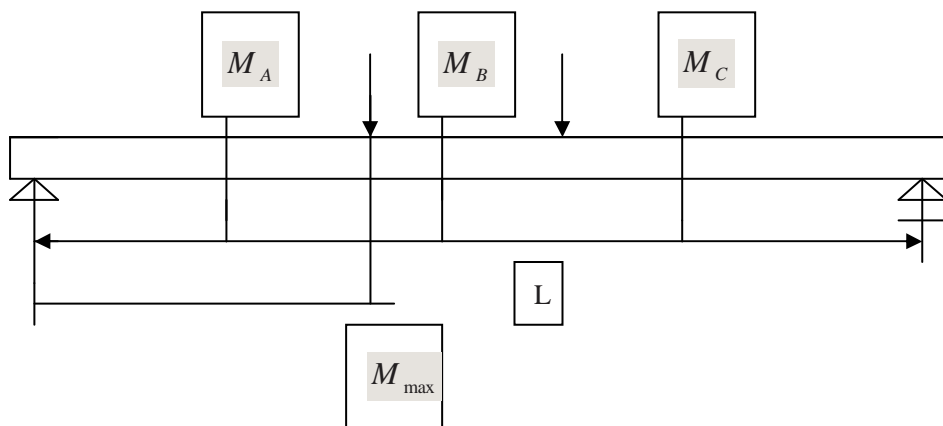
$$M_n = M_p$$

BENTANG MENENGAH (INELASTIC)

$$L_p \leq L_b \leq L_r$$

$$M_n = C_b \left[M_p - \left(M_p - M_r \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$
$$C_b = \frac{12.5 M_{\max}}{2.5 M_{\max} + 3 M_A + M_B + M_C}$$

$L_b = \text{Panjang balok}$
 $C_b = 1.0 \quad (\text{bila momen kontiniu})$



BENTANG PANJANG (LATERAL BUCKLING)

$$L_b > L_r$$

$$M_n = M_{cr} \leq M_p$$

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b} \right)^2 I_y I_w}$$

PEGARUH GESER OLEH GAYA LINTANG

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

dim *ana* :

$$\phi_v = 0.9$$

V_u = gaya geser terfaktor

V_n = kuat geser penampang

Leleh geser Badan:

$$V_n = 0.6 f_{yw} F_w \dots \dots \dots \text{bila : } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}}$$

Tekuk geser Elastoplastic :

$$V_n = 0.6 f_{yw} F_w (1.10) \frac{t_w}{h} \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}} \dots \dots \dots \text{bila : } 1.10 \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}}$$

Tekuk geser Elastic :

$$V_n = 0.9 k_n E F_w \frac{t_w^2}{h^2} \dots \dots \dots \text{bila : } \frac{h}{t_w} \geq 1.37 \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}}$$

bila :

$\lambda < 260 \dots \dots \dots$ balok tidak diperkaku

$\lambda > \lambda_r \dots \dots \dots$ balok tinggi

$$f_{yw} = \frac{(d - 2t_f)}{d} f_y$$

$$k_n = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h} \right)^2} \dots \dots \dots a = \text{jarak stiffener pengaku geser}$$

LENTUR & GESER

Momen Lentur terfaktor diimbangi oleh kekuatan Plat Sayap saja :

$$M_u \leq \phi_b \cdot (d - t_f) \cdot b \cdot t_f \cdot f_y$$

Dan Gaya Lintang terfaktor dipikul oleh kekuatan nominal badan (web) yaitu :

$$V_u \leq \phi_v \cdot V_n$$

Momen Lentur dan Gaya Lintang dipikul oleh tampang pada suatu titik secara bersamaan :

$$\frac{M_u}{\phi M_n} + 0.625 \frac{V_u}{\phi V_n} \leq 1.375$$

LENDUTAN MAXIMUM

$$\bar{Y} = \frac{L}{360} \dots \dots \dots \text{Balok memikul dinding dan berat sendiri terfaktor}$$

$$\bar{Y} = \frac{L}{240} \dots \dots \dots \text{Balok memikul berat sendiri terfaktor}$$

MOMEN LENTUR & GAYA AKSIAL (Penampang Prismatis) IWF & Channal & Ganda

$$\frac{N_u}{\phi_n N_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \dots \dots \dots \frac{N_u}{\phi_n N_n} \geq 0.2$$

$$\frac{N_u}{2\phi_n N_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \dots \dots \dots \frac{N_u}{\phi_n N_n} < 0.2$$

bila :

$$\phi_n = 0.90 \dots \dots (\text{tarik}) \quad \text{leleh}$$

$$\phi_n = 0.75 \dots \dots (\text{tarik}) \quad \text{fraktur}$$

$$\phi_n = 0.85 \dots \dots (\text{tekan})$$

$$\phi_n = 0.90 \dots \dots (\text{lentur})$$

PERHITUNGAN KUAT LENTUR DGN BATAS BATAS KELANGSINGAN PLAT BADAN

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \dots \dots \dots \text{bila :} \dots \dots \dots \frac{N_u}{\phi_b N_y} = 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \left[1.0 - \frac{2,75 N_u}{\phi_b N_y} \right] \dots \dots \dots \frac{N_u}{\phi_b N_y} \leq 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left[2,33 - \frac{N_u}{\phi_b N_y} \right] \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}} \dots \dots \dots \frac{N_u}{\phi_b N_y} > 0,125$$

$$\lambda_r = \frac{2550}{\sqrt{f_y}} \left[1.0 - \frac{0,74 N_u}{\phi_b N_y} \right]$$

CONTOH SOAL

Suatu struktur Gelagar Sederhana Balok Baja yang terdiri dari Propil IWF memikul beban mati serta beban hidup terbagi rata yang terletak diatas sendi dan rol

Dimana :

$$\begin{aligned} q_{bm} &= 790 \text{ kg/m} \\ q_{bh} &= 1000 \text{ kg/m} \\ f_y &= 240 \text{ Mpa} \\ k &= 1,12 \text{ (factor bentuk)} \end{aligned}$$

Penyelesaian

1. MENGHITUNG GAYA (M & D)

$$q_u = 1.2(790) + 1.6(1000) = 2550 \text{ kg/m} = 25.50 \text{ kN/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (25.50)(36) = 114.75 \text{ kN.m}$$

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot L = \frac{1}{2} (25.50)(6) = 76.5 \text{ kN}$$

2. DIMENSI

$$0,9M_n \geq M_u$$

$$0,9.Z_x.f_y \geq M_u$$

$$Z_x \geq \frac{M_u}{0,9.f_y} = \frac{114,75.10^2 \text{ kN.cm}}{0,9.240.10^3 \text{ kPa}} = 532 \text{ cm}^3$$

$$S_x \geq \frac{Z_x}{k} = \frac{532}{1.12} \geq 475 \text{ cm}^2$$

Chek beberapa penampang IWF yang paling ekonois dan kuat

IWF.300.150.6,5.9	----->..	$S_x = 481 \text{ cm}^3 > 475 \text{ cm}^3$
		$q = 36,7 \text{ kg/m}$
		$I_x = 7.210 \text{ cm}^4$
		$I_y = 508 \text{ cm}^4$
		$i_x = 12,4 \text{ cm}$
		$i_y = 3,29 \text{ cm}$
		$r = 13 \text{ mm}$

KELANGSINGAN :

Plat Sayap :

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = \frac{150}{2(9)} = 8,33 \leq \frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{240}} = 10,97 \text{ (Sayap kompak)}$$

Plat Badan :

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d - 2(t_f + r)}{t_w} = \frac{300 - 2(9 + 13)}{6.5} = 39,38 \leq \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = 108,40 \text{ (Plat badan compact)}$$

KONTROLE LENTUR & GESER

Kelangsingan Geser :

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = 39,38 < 1.10 \sqrt{\frac{k_n E}{f_{yw}}}$$

$$k_n = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 5 + \frac{5}{\left(\frac{600}{25,6}\right)^2} = 5$$

$$39,38 < 1.10 \sqrt{\frac{5.2,0(10^5)}{240}} = 71 \text{ (Pelat badan kompak terhadap tekuk geser)}$$

$$\phi V_n = 0,9(0,6)A_w \cdot f_y = 0,9(0,6)(h \cdot t_w) \cdot 240 = 0,9(0,6)(256)(6,5)(240) = 94,28 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = 94,28 \text{ kN} > V_u = 76,5 \text{ kN} \quad (\text{ok})$$

Metode Distribusi :

$$M_{Flens} = A_f \cdot (d - t_f) \cdot f_y = 150(9)(300 - 9)(240) = 94,28 \text{ kN.m} > M_u = 114,75 \text{ (No.OK)}$$

Tidak kuat menahan momen luar (t.ok)

Metode Interaksi :

$$\frac{M_u}{\phi M_n} + 0,625 \frac{V_u}{\phi V_n} < 1,375$$

$$\frac{114,75(10^6)}{0,9(1,12)(475 \cdot 10^3)(240)} + 0,625 \frac{76,5}{76,5} = 1,22 < 1,375 \quad (\text{OK})$$

KONTROLE LENDUTAN AKIBAT BEBAN TETAP

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{(q_{dl} + q_{ll})L^4}{EI_x} = \frac{5(179) \frac{\text{kg}}{\text{cm}} (6^4)(10^8) \text{cm}^4}{384(.2,0 \cdot 10^6)(7210) \text{kg.cm}^2} = 2,09 \text{ cm}$$

$$Y_{izin} = \frac{L}{240} = \frac{600}{240} = 2,5 \text{ cm} > \delta = 2,09 \quad (\text{OK})$$

KONTROLE TERHADAP PENGARUH LATERAL

$L < L_p$ tidak perlu pengaku

$$L_p = 1,76 i_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76(32,9) \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{240}} = 1710 \text{ mm}$$

$$\text{ambil } L_b = \frac{6000}{4} = 1500 \text{ mm} < 1710 \text{ mm} \quad (\text{dipasang 5 stiffner } \perp \text{ Web})$$

Bila tidak mau dipasang stiffner $L_b = 6000 \text{ mm}$

maka :

a. Runtuh dalam keadaan leleh (short – beam)

$$6000 < 1,76 i_y \sqrt{\frac{2,1(10^5)}{240}}$$

$$i_y > 115,2 \text{ mm}$$

$$\text{ambil IWF.400.400.45.70}$$

$$i_y = 11,1$$

$$L_b = \frac{6000}{2} = 3000 \text{ mm (dua bagian)}$$

$$i_y = \frac{3000}{52} = 57,69 \text{ mm}$$

$$\text{ambil IWF.350.250.8.12}$$

$$i_y = 5,92 \text{ cm}$$

b. Runtuh Pada tekuk elastis (Medium – beam)

$$\text{dengan mengambil } L_b = 2000 \text{ mm } L_p = 1710 \text{ mm } \& L_r = 4604 \text{ mm}$$

$$\text{sehingga : } L_p < L_b < L_r$$

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + M_B + M_c}$$

$$q = q_u / 1,12 = 22,8 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{1}{8} \cdot 22,8 \cdot 6^2 = 102,6 \text{ kN.m} = M_B$$

$$M_A = 22,8(3) \cdot \frac{6}{4} - 0,5(22,8) \left(\frac{6}{4} \right)^2 = 76,95 \text{ kN.m}$$

$$C_b = \frac{12,5(102,6)}{6,5(102,6) + 6(76,95)} = 1,136$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r) = 481(240 - 70) = 81,77 \text{ kN.m}$$

$$M_p = k \cdot S_x \cdot f_y = 129,29 \text{ kN.m}$$

$$M_n = 1,136 \left[129,29 - (129,29 - 81,77) \left[\frac{2000 - 1710}{4604 - 1710} \right] \right] = 141,48 \text{ kN.m} < M_p$$

$$\phi M_n = 0,9(141,48) = 127,33 \text{ kN.m} > M_u = 114,75 \text{ kN.m} \quad (ok)$$

$$L_r = \left(\frac{i_y \pi}{S_x (f_y - f_r)} \right) \sqrt{\frac{EF.GJ}{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4(f_y - f_r)^2 \frac{I_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2}}$$

$$I_w = \frac{I_f (d - t_f)^2}{2} = \frac{1/6 t_f b_f^3 (d - t_f)^2}{4} = 1/12 (150^3 \cdot 9 \cdot 291^2) = 1,07 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$

$$J = \frac{2b_f t_f^3}{3} + \frac{1}{3} (d - t_f) t_w^3 = \frac{1}{3} (300 \cdot 9^3 + 291 (6,5^3)) = 63 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$L_r = \left(\frac{32,9 \cdot (3,14)}{481 \cdot 10^3 (170)} \right) \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 (4533) (8 \cdot 10^4) (63 \cdot 10^3)}{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4(170)^2 \frac{1,07 \cdot 10^{11}}{508 \cdot 10^4} \left(\frac{481 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \cdot 63 \cdot 10^3} \right)^2}}$$

$$L_r = 4604 \text{ mm} > L = 2000 \text{ mm} \quad (T.O.K)$$

Diperbesar Profil menjadi IWF.300.200.9.14

$$L_r = 6283 \text{ mm}$$

$$L_p = 2423 \text{ mm}$$

Dengan cara yang sama dihitung

$$L_b = \frac{L}{4} = 1500 \text{ mm}$$

$$L_p < L_b < L_r \dots \dots \text{balok bentang menengah}$$

$$M_n = C_b \left[M_{p-} (M_p - M_r) \left(\frac{L - L_p}{L_r - L_p} \right) \right]$$

$$M_n = 1,136 [240 - (240 - 151,8) \frac{6000 - 2423}{6283 - 2423}] = 1,136 (158,3) = 179,79 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n = 0,9 (179,79) = 161,81 > M_u = 114,75 \text{ kN.m} \quad (OK)$$

c. Runtuh pada tekuk elastis (Balok panjang, torsional buckling)

IWF.300.150.6,5.9.....Jarak stiffner = 2000 mm

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b} \right)^2 I_y I_w}$$

$$M_{cr} = (1,136) \frac{3,14}{1500} \sqrt{2 \cdot 10^5 \cdot 508 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 63 \cdot 10^3 + 314^2 \cdot 508 \cdot 1,07 \cdot 10^{11}}$$

$$= 127,86 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_{cr} = 0,9 (127,86) = 114,91 > M_u = 114,75 \dots \dots (ok)$$