

Technical Note

PERHITUNGAN STRUKTUR BAJA DENGAN METODE LRFD DENGAN CONTOH BATANG TARIK DAN TEKAN

Oentoeng

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil - Universitas Kristen Petra

Catatan redaksi:

Untuk menyambut akan diberlakukannya peraturan baja yang baru, yang menggunakan cara perhitungan LRFD (*Load Resistance Factor Design*), dimuat beberapa contoh soal yang dibuat oleh Ir. Oentoeng.

PENDAHULUAN

Ada 3 cara perhitungan yang dapat digunakan untuk merencanakan struktur baja,

1. Metode Elastis (ASD = *Allowable Stress Design*)
2. Metode Plastis (PD = *Plastic Design*)
3. Metode LRFD (*Load Resistance Factor Design*)

Metode elastis menggunakan satu faktor keamanan (*factor of safety*), metode plastis menggunakan dua faktor beban (*load factor* = LF) untuk beban gravitasi LF = 1,7 dan beban sementara LF = 1,7. Sedangkan metode LRFD menggunakan ketidakseimbangan sebagai berikut:

$$\sum_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (1)$$

Semua beban Q dikalikan dengan faktor beban, γ , dan semua tahanan R di-kalikan dengan faktor tahanan, ϕ . Peraturan baja yang baru menggunakan sistem LRFD.

FAKTOR TAHANAN DAN FAKTOR BEBAN

Faktor tahanan, ϕ , ditentukan untuk bermacam-macam keadaan, misalnya $\phi = 0,9$ untuk balok dan $\phi = 0,85$ untuk kolom.

Faktor beban, γ , ditentukan atas dasar kombinasi beban yang harus dipilih:

$$\begin{aligned} Q_u &= 1,4 D_n \\ Q_u &= 1,2 D_n + 1,6 L_n + 0,5 (L_{rn}, S_n \text{ atau } R_n) \\ Q_{ui} &= 1,2 D_n + 1,6 (L_{rn}, S_n, R_n) + (0,5 L_{rn}, 0,8 W_n) \\ Q_u &= 1,2 D_n + 1,3 W_n + 0,5 L_n + 0,5 (L_{rn}, S_n, R_n) \\ Q_u &= 1,2 D_n + 1,0 E_n + 0,5 L_n + 0,2 S_n \\ Q_u &= 0,9 D_n \pm (1,3 W_n \text{ atau } 1,0 E_n) \end{aligned} \quad (2)$$

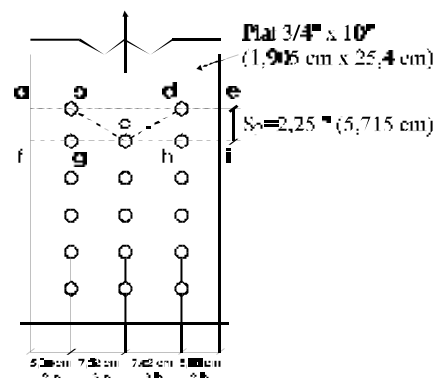
Dimana berturut-turut D_n , L_n , L_{rn} , S_n , R_n , W_n dan E_n adalah: *nominal dead, live, roof live, snow, rain, wind* dan *earthquake load*.

Makalah ini mengemukakan beberapa contoh soal dengan menggunakan cara perhitungan LRFD.

BATANG TARIK

Contoh 1.

Suatu pelat tebal 3/4 in (1,9 cm) dan lebar 10 in (25,4 cm) disambung dengan pelat lain, dengan menggunakan BMT ϕ 3/4 in (1,9 cm) (Gambar 1). Mutu baja A36, $F_y = 36$ ksi (248 MPa); $F_u = 58$ ksi (400 MPa). (Gambar 1)



Gambar 1. Pola Sambungan

Luas penampang efektif neto, A_e , dapat ditentukan sebagai berikut:

$$A_e = A_{gross} - ndt + \sum \frac{S_2^2 \times t}{4u} \quad (3)$$

dimana

n = banyak lubang pada penampang

= 3 untuk penampang abcde,

= 2 untuk penampang abde.

d = diameter lubang,

untuk baut ϕ 3/4 in, $d = 13/16$ in,

untuk perhitungan, lubang baut harus ditambah 1/16 in menjadi 7/8 in.

t = tebal pelat.

u = jarak mendatar 2 lubang,

S_2 = jarak vertikal 2 lubang berurutan.

= 0, untuk penampang abde

Berdasarkan rumus 3, luas efektif neto adalah yang terkecil dari:

$$A_{e1} = 3/4(10 - 2 \times (7/8)) = 6,19 \text{ in}^2 \quad (\text{abde})$$

$$A_{e2} = 3/4(10 - 3 \times 7/8 + \frac{2 \times 2,25^2}{4 \times 3}) = 6,16 \text{ in}^2, (\text{abcde})$$

Kekuatan desain dari tarikan adalah yang terkecil dari:

$$\phi P_{n1} = 0,9 \times 36 \times 3/4 \times 10 = 243 \text{ kips (1080,96 kN) (leleh)}$$

$$\phi P_{n2} = 0,75 \times 58 \times 6,16 = 268 \text{ kips (1192,17 kN) (retak)}$$

Dengan kapasitas 1080,96 kN, ada kemungkinan penampang neto penuh dengan 3 lubang (fgchi) yang mengontrol kekuatan. Beban yang tinggal, P_s , setelah 2 baut yang pertama menerima beban, adalah:

$$P_s = 12/14 \times 1080,96 \text{ kN} = 926,5 \text{ kN}$$

Luas neto dengan 3 lubang (fgchi)

$$A_e = 3/4 (10 - 3 \times 7/8) = 5,53 \text{ in}^2$$

Kapasitas pada penampang melalui fgchi:

$$\begin{aligned} \phi P_{n3} &= 0,75 \times 58 \times 5,53 \\ &= 240,6 \text{ kips (1067,76 kN)} \\ &> 926,5 \text{ kN (OK)} \end{aligned}$$

Contoh 2

Catatan:

Perhitungan LRFD ini didasarkan atas AISC LRFD 1994. Untuk memudahkan urutan perencanaan yang berdasarkan begitu banyak persyaratan yang harus dipenuhi, perhitungan dilakukan dalam suatu diagram alir (*Flowchart*, Gambar 2)¹.

Suatu penggantung balok rantai mendapat beban tarik mati sebesar 30 kips (133,44 kN) dan beban hidup 40 kips (178 kN). Beban hidup penuh berulang kurang dari 20000 kali dan tegangan leleh $F_y = 10 \text{ ksi}$ (689,5 MPa). Dipilih

batang baja bertampang bulat jenis *rod with upset ends* (Gambar 3).

Untuk meninjau batang tarik rumus (1) menjadi:

$$\phi P_n \geq P_u \quad (4)$$

dimana:

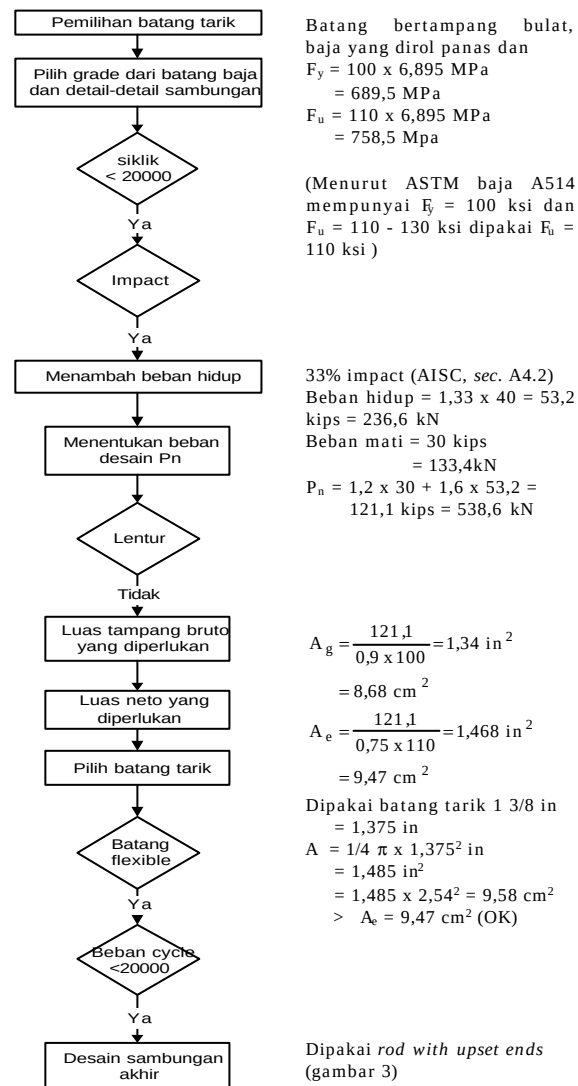
P_u = beban yang dipikul

P_n = kekuatan batas (*limit states strenght*)

ϕ = faktor tahanan (*resistance factor*)

Harus diperiksa dua kemungkinan sebagai berikut:

1. Kekuatan batas leleh dari luas penampang bruto, A_g , $\phi_t = 0,9$; $P_n = F_y \times A_g$
2. Kekuatan batas retak (fracture) dari luas neto efektif, A_e , pada akhir dari batang tarik, $\phi_t = 0,75$; $P_n = F_u \times A_e$



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan

¹ Flowchart selengkapnya dapat dilihat di Galambos, T.V., Lin, F.J., Johnston, B.G., Basic Steel Design with LRFD



Gambar 3. Rod with upset ends

Contoh 3

Suatu batang pada rangka batang atap panjang 25 ft (762 cm) memikul beban tarik mati, $D=40$ kips (117,9 kN), beban tarik hidup, $L=60$ kips (266,9 kN) dan beban tarik akibat angin, $W=45$ kips (200 kN).

Kombinasi beban yang dipakai (rumus 2):

$$Q_u = 1,2 D + 1,6 L = 144 \text{ kips (640,5 kN)}$$

$$Q_u = 1,2 D + 1,3 W + 0,5 L \\ = 136,5 \text{ kips (607 kN)}$$

Jadi yang menentukan 640,5 kN.

Dipakai ASTM, A36, $F_y = 36$ ksi (248 MPa), $F_u = 58$ ksi (400 MPa)

$$A_e = u \times A, \quad \begin{aligned} u &= 0,9 \text{ jika } b_f/d \geq 2/3, \\ u &= 0,85 \text{ jika } b_f/d < 2/3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A_g &\geq \frac{640,5}{0,9 \times 36 \times 6,895 \times 0,1} = 28,67 \text{ cm}^2 \\ A_e &\geq \frac{640,5}{0,75 \times 58 \times 6,895 \times 0,1} = 21,35 \text{ cm}^2 \end{aligned} \right\} A_g > A_e (\text{OK})$$

Coba W6 x 15 (Gambar 4) dimana

$$A = 4,43 \text{ in}^2 = 28,67 \text{ cm}^2 = A_g (\text{OK})$$

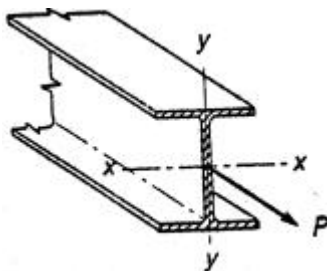
$$b_f = 5,99 \text{ in}; d = 5,99 \text{ in}$$

$$r_x = 2,56 \text{ in}; r_y = 1,46 \text{ in}$$

$$b_f/d \geq 2/3 \text{ maka } u = 0,9$$

$$A_e = 0,9 \times 4,43 = 3,99 \text{ in}^2 = 25,74 \text{ cm}^2 \\ > 21,35 \text{ cm}^2 (\text{OK})$$

$$\frac{L}{r} \leq \frac{762}{1,64 \times 2,54} = 205 < 300 (\text{OK})$$



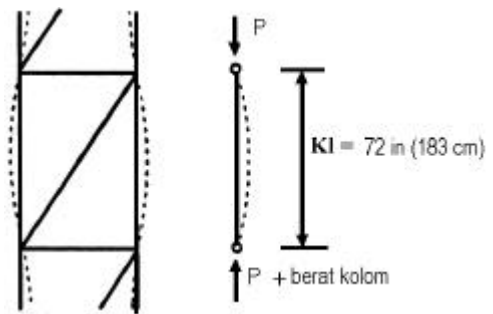
Gambar 4. W 6 x 15

BATANG TEKAN

Contoh 1

Suatu bagian dari suatu rangka antena TV, mempunyai elemen longitudinal utama yang memikul beban tekan aksial P dan dikekang (*braced*) arah lateral setiap 6 ft (183 cm). Ujung-ujung batang dianggap sendi.

Garis titik-titik pada Gambar 5 menunjukkan moda tekuk natural dari elemen tekan pada suatu keruntuhan. Dipilih batang berpenampang bulat dengan mutu baja A36, $F_y = 36$ ksi (248 MPa).



Gambar 5. Moda tekuk

Gaya-gaya aksial:

Beban mati: $P_d = 107$ kips (475,94 kN)

Beban angin: $P_w = 200$ kips (889,6 kN)

Kekuatan yang diperlukan (rumus 2):

$$P_u = 1,2 \times 475,94 + 1,3 \times 889,6 \\ = 1727,61 \text{ kN}$$

Dipilih batang bertampang bulat diameter $\phi 4,5$ in (11,43 cm) dengan mutu baja: A36, $F_y = 36$ ksi (248 MPa).

Panjang efektif batang dengan ujung-ujung sendi, $K = 1$, $KL = 72$ in (183 cm)

Luas tampang: $A = 15,19 \text{ in}^2$

Berat/ft : 54,1 lb/ft

Berat kolom: $6 \times 0,541 = 0,3$ kip

$$\text{Jari-jari inersia: } r = \frac{1}{4} d = \frac{4,5}{4} = 1,125 \text{ in}$$

Rasio kelangsingan (*slenderness ratio*):

$$\frac{KL}{r} = \frac{72}{1,125} = 64 < 200 (\text{OK}) (\text{AISC sec. B7})$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{64}{\pi} \sqrt{\frac{36}{29000}} = 0,718$$

$$F_{cr} = F_y \left(0,658^{\lambda_c^2} \right) = 36 \left(0,658^{0,718^2} \right) = 29,02 \text{ ksi}$$

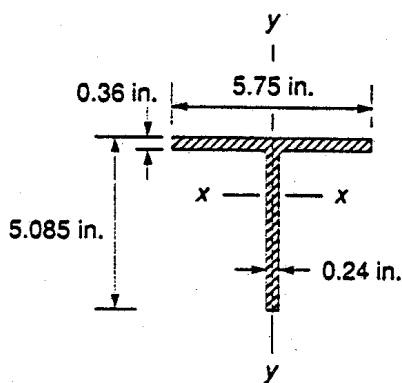
Design Strength (AISC sec.E2)

$$\begin{aligned} \phi_c P_n &= \phi_c \cdot A \cdot F_{cr} = 0,85 \times 15,19 \times 29,02 \\ &= 392 \text{ kips} \\ &> P_u = 388 \text{ kips (OK).} \end{aligned}$$

Dipakai batang bulat $\phi 4,5$ in.

Contoh 2

Batang tekan dari profil WT 5x11 (Gambar 6) dengan panjang efektif 8 ft (2,438 m) dan ujung-ujung sendi dipakai baja A36. Beban yang dipikul ialah beban mati, $P_d = 12$ kips (53,375 kN) termasuk 0,1 kips berat sendiri, beban salju, $P_s = 35$ kips (155,68 kN) dan beban angin, $P_w = 10$ kips (44,48 kN).



Gambar 6. Balok WT

Kombinasi yang menentukan (Rumus 2)

$$\begin{aligned} P_u &= 1,2 P_d + 1,6 P_s + 0,8 P_w \\ &= 78,4 \text{ kips (348,72 kN)} \end{aligned}$$

Batang tekan yang dipilih adalah profil T, WT 5x11. Dari tabel AISCM:

$$\begin{aligned} A &= 3,24 \text{ in}^2; r_x = 1,46 \text{ in}; r_y = 1,33 \text{ in} \\ d &= 5,085 \text{ in}; t_w = 0,24 \text{ in} \\ b_f &= 5,75 \text{ in}; t_f = 0,36 \text{ in} \end{aligned}$$

Karena untuk $F_y = 36$ ksi harga Q_s tidak ada, dipakai harga Q_s untuk $F_y = 50$ ksi yaitu

$$\begin{aligned} Q_s &= 0,836 \text{ bagi } F_y = 50 \text{ ksi} \\ J &= 0,119 \text{ in}^4 \\ r_o &= 2,17 \text{ in} \\ H &= 0,831 \\ W &= 11 \text{ lb/ft} \\ L &= 8 \text{ ft} \end{aligned}$$

Berat kolom: $W = w \cdot L = 0,011 = 0,088$ kip

$$\begin{aligned} E &= 29000 \text{ ksi,} \\ G &= 0,385 E = 11200 \text{ ksi} \end{aligned}$$

Faktor panjang efektif; $K = 1$

Rasio kelangsingan dari kolom:

$$\frac{KL}{r_x} = 65,753, \quad \frac{KL}{r_y} = 72,18 < 200 \quad (\text{OK})$$

Maka tekuk terjadi dalam arah sumbu y

Periksa rasio lebar/tebal dari plat sayap dan badan: (AISC Table B5.1);

Sayap:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = 7,986 \quad \lambda_r = \frac{95}{\sqrt{F_y}} = 15,833 \text{ (OK) } (\lambda_r > \lambda)^2$$

Badan:

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = 21,188 \quad \lambda_r = \frac{127}{\sqrt{F_y}} = 17,961$$

Karena $\lambda_r < \lambda$, teruskan ke appendix B5.1 dari AISCS untuk menghitung Q . Harga Q ini juga dapat diperoleh dari tabel AISCM Part 1.

Menentukan kapasitas kolom menurut AISCS, Section E3

$$\lambda_{cy} = \frac{KL}{r_y \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0,954 \quad \lambda_{cyq} = \lambda_{cy} \sqrt{Q_s} = 0,872$$

$$F_{cry} = Q_s \cdot F_y \cdot 0,658^{\lambda_{cyq}^2} = 30,4 \text{ ksi}$$

$$F_{crz} = \frac{GJ}{Ar_o^2}$$

$$E = 29000 \text{ ksi,}$$

$$G = 0,385 E = 11200 \text{ ksi}$$

$$F_{crz} = \frac{11200 \times 0,119}{3,24 \times 2,17^2} = 87,4 \text{ ksi}$$

$$\begin{aligned} F_{crft} &= \frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \left[1 - \sqrt{\frac{4F_{cry} \cdot F_{crz} \cdot H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \\ &= \frac{30,4 + 87,1}{2 \times 0,831} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 30,4 \cdot 87,1 \cdot 0,831}{(30,4 + 87,1)^2}} \right] \\ &= 70,698 \times 0,398 \\ &= 28,137 \text{ ksi} \approx 28,1 \text{ ksi} \end{aligned}$$

$$\phi_c = 0,85$$

$$P_n = A \times F_{crft}$$

P_n terfaktor

$$\begin{aligned} \phi_c P_n &= \phi_c \times A \times F_{crft} \\ &= 0,85 \times 3,24 \times 28,1 \\ &= 77,4 \text{ kips} \\ &< P_u = 78,4 \text{ kips (tidak memenuhi)} \end{aligned}$$

² rumus λ_r didapat dari AISCS, Table 35.

Karena beda antara 77,4 kips dengan 78,4 hanya kecil saja, maka dinaikkan satu tingkat saja akan cukup, yaitu dipakai profil WT 5x13, dimana:

$$A = 3,81 \text{ in}^2; r_x = 1,44 \text{ in}; r_y = 1,63 \text{ in}$$

$$d = 5,235 \text{ in}; t_w = 0,3 \text{ in}$$

$$b_f = 5,77 \text{ in}; t_f = 0,44 \text{ in}$$

Karena untuk $F_y = 36 \text{ ksi}$ harga Q_s tidak ada, dipakai harga Q_s untuk $F_y = 50 \text{ ksi}$ yaitu

$$Q_s = 0,902$$

$$J = 0,201 \text{ in}^4$$

$$r_o = 2,15 \text{ in}$$

$$H = 0,848$$

$$W = 13 \text{ lb/ft} = 0,013 \text{ kip/ft}$$

$$L = 8 \text{ ft}$$

$$W = w.L = 0,013 \times 8 = 0,104 \text{ kips}$$

$$\frac{KL}{r_x} = \frac{1 \times 8 \times 12}{1,44} = 66,667,$$

$$\frac{KL}{r_y} = \frac{1 \times 8 \times 12}{1,36} = 70,588 < 200 \text{ (OK)}$$

Sayap:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = 6,557, \lambda_r = \frac{95}{\sqrt{F_y}} = 15,833 \quad \lambda < \lambda_r \quad \text{(OK)}$$

Badan:

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = 17,45, \lambda_r = \frac{127}{\sqrt{F_y}} = 17,961 \quad \lambda_r < \lambda$$

diteruskan:

$$\lambda_{cy} = \frac{KL}{r_y \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 0,791, \lambda_{cyq} = \lambda_{cy} \sqrt{Q_s} = 0,751$$

$$F_{cry} = Q_s \cdot F_y \cdot 0,658^{\lambda_{cyq}^2} = 25,645 \text{ ksi}$$

$$F_{crz} = \frac{GJ}{A \cdot r_o^2}$$

$$F_{crz} = \frac{11200 \times 2,01}{3,81 \times 2,15^2} = 127,8 \text{ ksi}$$

$$F_{crft} = \frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} \cdot F_{crz} \cdot H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] = 24,594 \text{ ksi}$$

$$P_n = 0,85 \times 3,81 \times 24,549 = 79,5 \text{ kips} \\ > P_u = 78,4 \text{ kips (OK)}$$

Jadi profil yang dipakai ialah: WT 5x13