

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Landasan Umum

Kuda-kuda rangka batang (truss) adalah suatu struktur kerangka yang terdiri dari batang-batang yang dihubungkan satu sama lainnya dengan perantara titik-titik simpul yang berupa sendi tanpa gesekan dimana gaya-gaya luar bekerja melalui titik-titik ini.

Asumsi yang digunakan dalam analisis rangka kuda-kuda ini adalah joint-jointnya dianggap sendi, sehingga berdasarkan asumsi tersebut maka setiap komponen rangka hanya memikul gaya aksial tarik atau tekan saja. Kuda-kuda yang menerima beban merata, maka pada batang tepi atasnya akan menerima gaya tekan dan pada batang tepi bawahnya akan menerima gaya tarik. Susunan batang-batang juga akan mempengaruhi kekuatan struktur rangka batang tersebut, dalam hal ini adalah kekakuannya. Semakin kaku kuda-kuda tersebut maka akan semakin besar pula beban yang dapat dipikul.

Struktur kuda-kuda dari profil bentukan dingin dapat disusun dalam berbagai variasi bentuk tampang, diantaranya adalah bentuk Triple Fink dan Triple Fan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1

Dengan menggunakan metode titik buhul (gambar 3.3), dapat dicari besarnya gaya batang yang terjadi.

$$\Sigma V = 0$$

$$R_{AV} - A_1 \sin \alpha = 0 \quad A_1 = \frac{R_{AV}}{\sin \alpha} \quad (3.4)$$

$$\Sigma H = 0$$

$$R_{AH} + A_2 + A_1 \cos \alpha = 0 \quad A_2 = R_{AH} - \frac{R_{AV}}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha \quad (3.5)$$

Kemudian dilanjutkan untuk titik buhul C, D, J, E, K, F, D, H, L, I dan B.

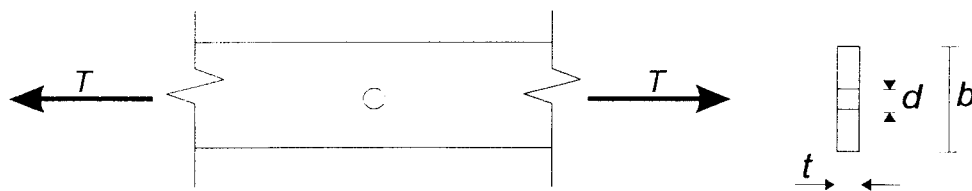
3.2.1 Batang Tarik

Elemen struktur batang tarik adalah batang yang mendukung gaya tarik aksial yang diakibatkan oleh bekerjanya gaya tarik aksial pada ujung-ujung batang tersebut. Kestabilan batang ini sangat baik sehingga tidak perlu ditinjau lagi dalam perencanaan. Bahkan tegangan tarik batas dapat dengan mudah dicapai bila sambungan ujung direncanakan lebih kuat dari kekuatan batangnya.

3.2.2 Luas Tampang Netto

Untuk keperluan pemasangan baut atau paku keling, batang baja harus dilubangi terlebih dahulu. Gambar 3.4 menunjukkan pengurangan luas penampang melintang sebagai akibat adanya lubang untuk sambungan. Lubang-lubang tersebut merupakan perlemahan yang harus diperhitungkan dalam perencanaan.

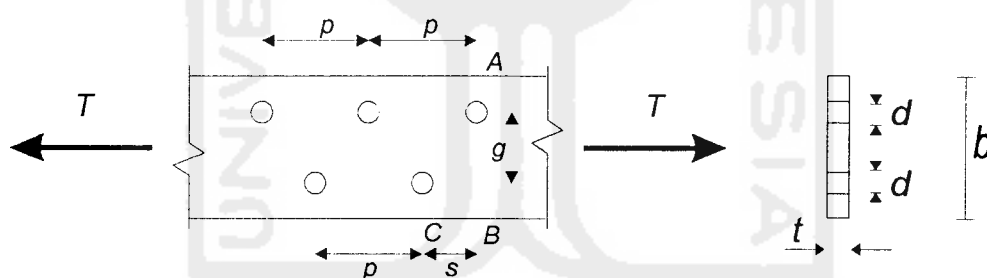
Besarnya luasampang netto suatu profil yang berlubang dapat dihitung dengan rumus:



Gambar 3.4 Penampang netto

$$A_g = b \times t \quad A_n = (b-d) \times t \quad (3.6)$$

Bila pada suatu batang terdapat lebih dari satu lubang dan lubang-lubang tersebut *tidak* terletak pada satu garis yang tegak lurus arah pembebanan, maka banyaknya garis keruntuhan yang potensial akan lebih dari satu seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Garis keruntuhan yang menentukan adalah garis yang menghasilkan luas netto terkecil.



Gambar 3.5 Garis keruntuhan pada penampang netto

Untuk menentukan penampang kritis, baik jejak $A-B$ maupun jejak $A-C$ harus diperiksa. Perhitungan kekuatan sepanjang jejak $A-C$ yang sebenarnya sangat kompleks, namun hubungan empiris yang sederhana diusulkan oleh V. H.

Cochrane untuk memperhitungkan selisih antara jejak $A-C$ dan jejak $A-B$. selisih ini dinyatakan sebagai koreksi panjang,

$$s^2 / 4g \quad (3.7)$$

dengan s adalah jarak seling sejajar (yaitu jarak antara lubang bersebelahan yang sejajar arah pembebanan) dan g adalah jarak tegak (yaitu jarak lubang yang tegak lurus arah pembebanan).

$$\text{Panjang netto A-B} = \text{panjang (A - B)} - (\text{lebar lubang} + \frac{1}{16} \text{ "}) \quad (3.8)$$

$$\text{Panjang netto A-C} = \text{panjang (A-B)} - 2(\text{lebar lubang} + \frac{1}{16} \text{ "}) + (s^2/4g) \quad (3.9)$$

Luas netto ditentukan dengan mengalikan panjang netto minimum dengan tebal pelat.

Walaupun stabilitas bukan merupakan kriteria dalam perencanaan batang tarik namun panjangnya tetap harus dibatasi untuk mencegah batang terlalu fleksibel (mudah melentur). Batang tarik yang terlalu panjang bisa melendut secara berlebihan akibat berat sendiri. Selain itu, batang ini juga bisa bergerak bila dibebani gaya angin seperti pada rangka batang terbuka atau bila bertumpu pada peralatan yang bergetar seperti kipas atau kompresor.

Untuk mengurangi masalah yang berkaitan dengan lendutan yang berlebihan dan getaran, kriteria kekakuan ditetapkan. Kriteria ini didasarkan pada

angka kelangsingan batang, L/r , dengan L adalah panjang batang dan $r = \left(\frac{I}{A} \right)^{1/4}$

adalah jari-jari inersia terkecil.

Tabel 3.1 Angka kelangsingan maksimum untuk batang tarik

	<i>AISC</i>	<i>AASTHO</i>
Untuk batang utama	240	200
Untuk pengaku lateral dan batang sekunder lain	300	240
Untuk batang yang mengalami pembalikan tegangan	-	140

Dalam menerapkan kriteria kekuatan pada batang tarik, angka kelangsingan terbesar dari dua sumbu utama harus digunakan. Batang yang simetris bisa mempunyai dua harga jari-jari inersia yang berlainan, dan untuk batang yang tak simetris kita harus meninjau sumbu utama yang paling lemah. Bila batang tarik dibentuk dari sejumlah profil, jari-jari inersia harus dihitung dengan menggunakan momen inersia I dan luas penampang lintang A . Harga untuk r harus berdasarkan sumbu yang sama dengan yang digunakan untuk momen inersia.

3.2.3 Kuat Tarik

Perencanaan batang tarik pada hakikatnya adalah menentukan luas penampang lintang bahan yang cukup untuk menahan beban (yang diberikan) dengan faktor keamanan yang memadai terhadap keruntuhan.

Kekuatan batang tarik yang berlubang atau berulir dapat dituliskan sebagai :

$$T_u = F_y A_n \quad (3.10)$$

Dengan F_y adalah tegangan leleh dan A_n adalah luas netto penampang lintang.

3.2.4 Batang Tekan

Batang tekan (compression member) adalah elemen struktur yang mendukung gaya tekan aksial. Pada struktur gedung, batang tekan sering dijumpai sebagai kolom, sedangkan pada struktur rangka batang (jembatan, kuda-kuda) dapat berupa batang tepi, batang diagonal, batang vertikal dan batang-batang pengekang (bracing). Istilah kolom digunakan untuk batang tekan yang perbandingan panjang terhadap penampangnya relatif besar.

Kapasitas dukung batang tekan dipengaruhi oleh banyak faktor. Salah satu diantaranya adalah kelangsingan. Semakin langsing suatu batang maka kuat tekannya semakin kecil. Kelangsingan juga berpengaruh terhadap ragam keruntuhan. Berdasarkan ragam keruntuhan, batang tekan dapat digolongkan menjadi 3, yaitu batang langsing, sedang dan pendek. Hanya batang pendek saja yang dapat dibebani hingga tegangan lelehnya tercapai. Keadaan yang umum terjadi adalah tekuk (buckling) atau lenturan mendadak akibat ketidakstabilan terjadi sebelum kekuatan batang sepenuhnya tercapai.

Batang tekan dapat dirancang dengan profil tunggal maupun profil tersusun. Jika beban yang didukung relatif kecil dan kapasitas profil tunggal yang tersedia memadai, umumnya akan dipilih profil tunggal. Jika beban yang harus didukung relatif besar sedangkan kapasitas profil tunggal yang ada tidak memadai maka dapat digunakan profil tersusun.

3.2.5 Kuat Tekan

Untuk menentukan kekuatan batang tekan, ada beberapa anggapan yang harus diidealkan : (1) sifat tegangan-regangan tekan sama di seluruh titik pada penampang; (2) tidak ada tegangan internal seperti akibat pendinginan setelah penggilingan (rolling) dan pengelasan; (3) batang lurus sempurna dan prismatis; (4) resultante beban bekerja melalui sumbu pusat batang sampai batang mulai melentur; (5) kondisi ujung batang harus statis tertentu sehingga panjang antara sendi-sendi ekuivalen dapat ditentukan; (6) teori lendutan yang kecil seperti pada lenturan yang umum berlaku dan gaya geser dapat diabaikan; (7) puntiran atau distorsi penampang melintang tidak terjadi selama melentur. (Charles G. Salmon, Struktur Baja, hal 254).

Setelah anggapan-anggapan diatas dibuat, dapat disetujui bahwa kekuatan suatu batang desak dapat dinyatakan sebagai :

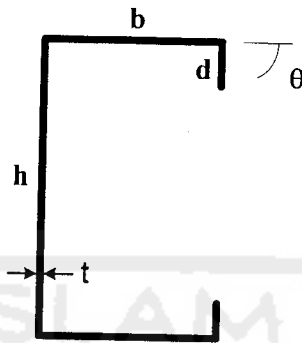
$$F_{cr} = \frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \quad (3.11)$$

Dengan $\frac{P}{A}$ = tegangan rata-rata pada penampang
 E_t = modulus tangen pada penampang
 $\frac{KL}{r}$ = angka kelangsingan efektif

3.2.6 Tekuk

Satu hal yang harus diperhatikan adalah kemungkinan terjadinya tekuk, baik tekuk lokal maupun tekuk secara keseluruhan. Pada umumnya material yang dipakai dalam proses pembuatan profil bentukan dingin adalah relatif tipis jika

dibanding dengan lebarnya, hal ini memberikan rasio lebar terhadap tebal yang memungkinkan terjadinya tekuk pada tahanan dibawah tegangan lelehnya.



gambar 3.6 Profil Lipped Channel

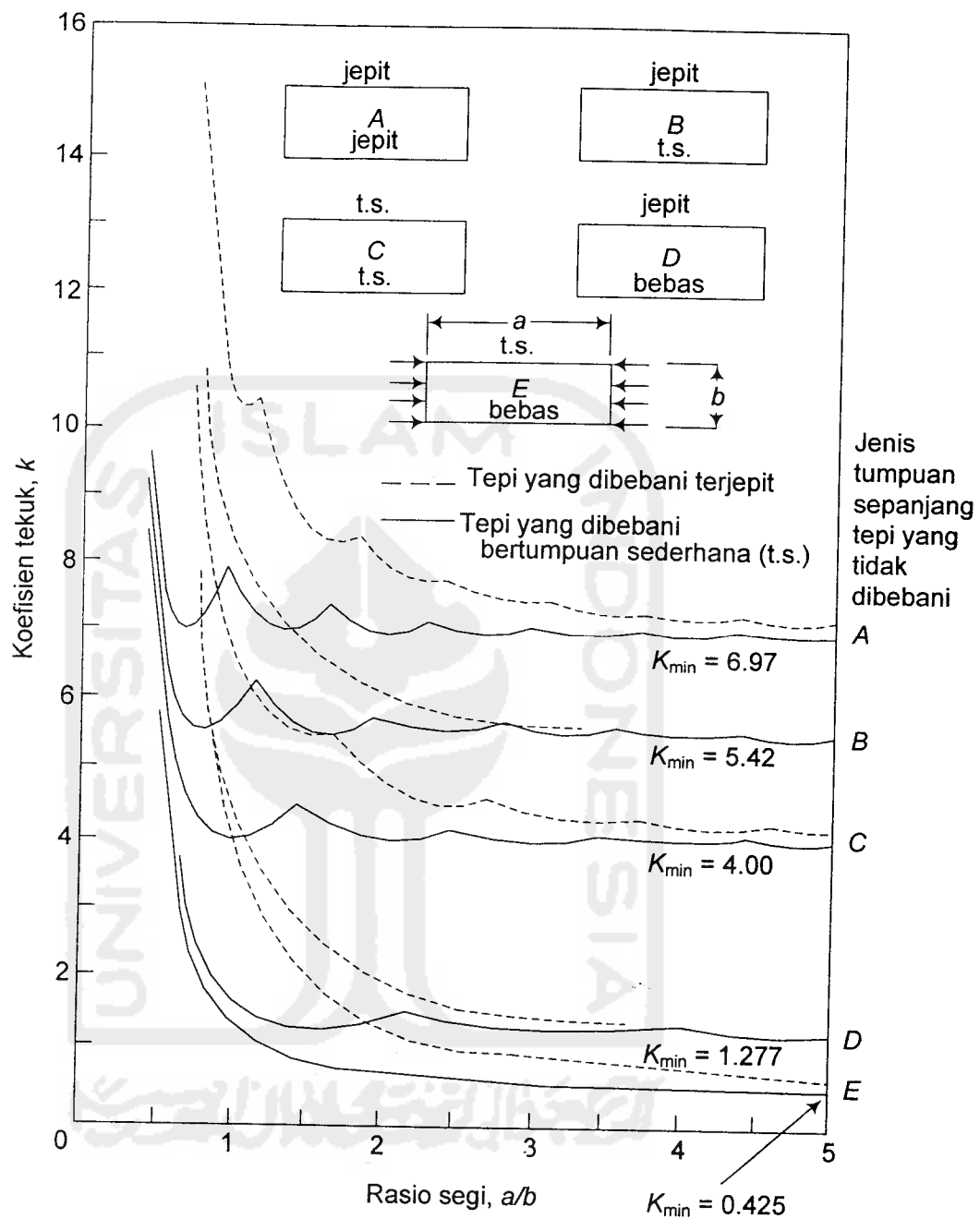
Gambar 3.6 memperlihatkan dimensi dari profil lipped channel, dengan :
 h adalah tinggi badan, b = lebar sayap, d = panjang lip, θ = sudut lip (radians), dan t = tebal profil.

- Tekuk Lokal

Tekuk Lokal adalah keadaan dimana hanya sebagian dari penampang profil mengalami tekuk, baik itu pada bagian sayap (flange local buckling) ataupun pada bagian badannya (web local buckling).

$$F_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1 - \mu)^2 \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.12)$$

koefisien tekuk k merupakan fungsi dari jenis tegangan, kondisi tumpuan tepi, dan rasio segi (aspect ratio). Gambar 3.7 menunjukkan nilai koefisien tekuk k pada pelat segi empat datar untuk berbagai kondisi tumpuan tepi.



Gambar 3.7. Koefisien Tekuk Elastis Untuk Tekanan Pada Pelat Segi Empat Datar

(Gerard dan Becker, Handbook of Structural Stability, 1957)

- Tekuk Total

Untuk Batang Pendek : $\frac{KL}{r} < Cc$

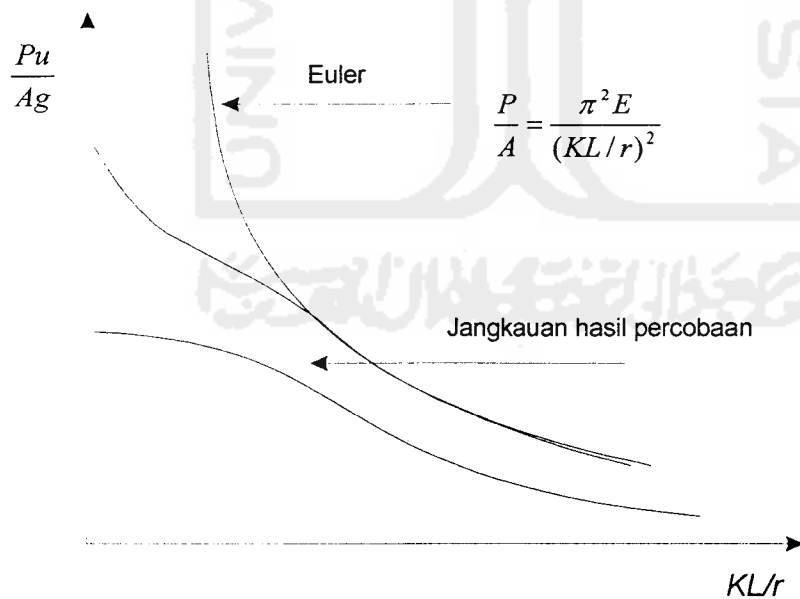
$$F_{cr} = F_y \left[1 - 0,5 \left(\frac{KL/r}{Cc} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Untuk Batang Langsing : $\frac{KL}{r} > Cc$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.13)$$

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*.



Gambar 3.8 Jangkauan kekuatan batang tekan

Seperti yang diperlihatkan oleh gambar 3.8, hasil penelitian laboratorium menunjukkan bahwa kuat tekan batang langsing sesuai dengan persamaan Euler, namun tidak demikian dengan kuat tekan batang sedang dan batang pendek. Hal ini disebabkan karena persamaan Euler selalu menggunakan modulus elastis yang harganya tetap sedangkan keruntuhan batang sedang dan batang pendek terjadi setelah penampangnyua tidak elastis, berarti terdapat perubahan nilai modulus dari modulus elastis yang harganya tetap ke modulus yang harganya berubah-ubah. Karena persamaan Euler selalu menggunakan modulus elastis maka batas berlakunya hanya sampai dengan batas proporsional (proportional limit), diatas batas itu persamaan Euler tidak berlaku.

3.3 Lendutan

Gaya yang ditimbulkan akibat beban yang bekerja akan menyebabkan terjadinya lendutan (defleksi) pada suatu rangka batang. Besarnya deformasi vertikal yang boleh terjadi pada suatu struktur kuda-kuda dibatasi dari : $L/180 - L/360$ (AISC). Deformasi yang berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada bangunan, mempengaruhi mekanisme transfer beban, serta mengganggu kenyamanan dari pemakai. Walaupun pembatasan deformasi maksimum ini demi alasan kenyamanan, namun demikian tetap perlu menjadi pertimbangan dalam desain. Deformasi yang terjadi karena beban yang bekerja tidak boleh mengurangi kemampuan dari struktur tersebut.

Defleksi dapat diakibatkan oleh berbagai gaya, seperti gaya aksial, gaya geser dan momen yang bekerja pada batang. Defleksi yang diakibatkan oleh gaya

aksial dan gaya geser umumnya lebih kecil jika dibandingkan dengan defleksi akibat momen. Oleh karena itu maka defleksi akibat gaya aksial dan gaya geser sering diabaikan, dan hanya defleksi akibat momen yang diperhitungkan. Pada suatu struktur rangka batang, defleksi terjadi akibat perubahan panjang dari batang-batang penyusunnya.

3.3.1 Lendutan pada rangka batang

Lendutan pada suatu rangka batang dapat dicari dengan berbagai macam cara, salah satunya adalah dengan menggunakan metode “Virtual Work” yang dikembangkan oleh Johann Bernoulli (1717). Secara umum, persamaan untuk mencari lendutan dari suatu rangka batang adalah :

$$\Delta = \sum_1^n \frac{pPL}{AE}$$

dimana :

Δ = lendutan

P = gaya batang yang terjadi akibat beban yang bekerja

p = gaya batang akibat satu unit ‘virtual work’ pada joint yang akan dicari lendutannya

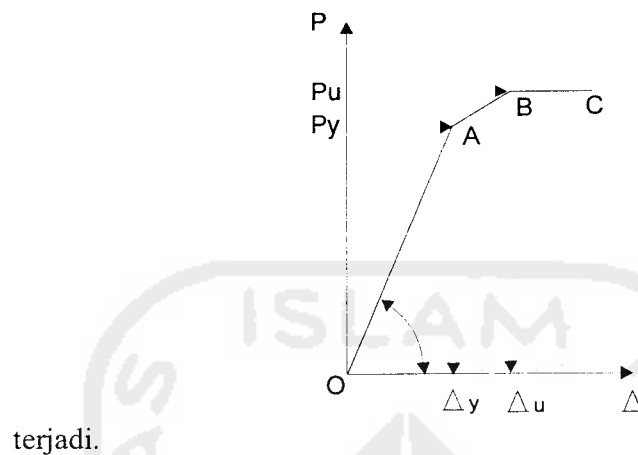
A = luas penampang profil

E = modulus elastis

n = jumlah batang penyusun

3.3.2 Hubungan Beban – Lendutan

Semakin besar beban yang bekerja semakin besar pula lendutan yang akan



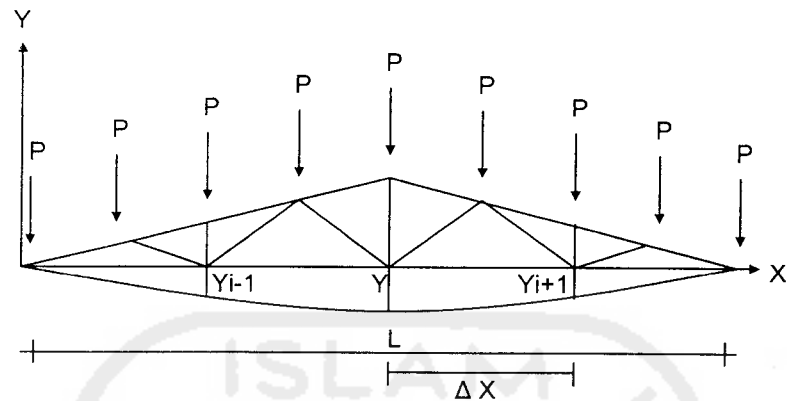
terjadi.

Gambar 3.9 Grafik hubungan Beban (P) – Lendutan (Δ)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh *American Sosciety for Testing and Material (ASTM)*, kekakuan rangka hingga beban patah dinyatakan dengan garis OA pada diagram beban-lendutan atau disebut juga dengan daerah elastis. Dengan penambahan beban maka rangka akan menjadi plastis sebagian yang ditunjukkan dengan garis AB. Jika beban ditambah lagi maka rangka akan menjadi plastis sempurna yang ditunjukkan dengan garis BC, setelah itu rangka atau struktur tidak mampu lagi memikul tambahan beban.

$$k = \operatorname{tg}\alpha = P/\Delta \quad (3.16)$$

3.4 Hubungan Momen Kelengkungan



Gambar 3.10 Rangka Kuda-Kuda Yang Diberi Beban Aksial (P) Sehingga Terjadi Lendutan (Y_i)

Apabila suatu material diberi beban maka material itu secara langsung akan terdefleksi (gambar 3.10). Semakin besar beban yang diberikan pada suatu material semakin besar pula defleksi yang terjadi pada material tersebut. Mengacu pada gambar diatas, $dy dx$ didekati dengan persamaan berikut :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \quad (3.17)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} \quad (3.18)$$

Dengan menggunakan formula 3.17 atau 3.18 maka turunan kedua persamaan tersebut adalah:

$$\frac{d^2 y}{dx} = \frac{d\left(\frac{dy}{dx}\right)}{\Delta x}$$

3.5 Sambungan

Setiap struktur adalah gabungan dari bagian-bagian tersendiri atau batang-batang yang harus disambung bersama (biasanya di ujung batang). Salah satu cara yang dapat digunakan dalam penyambungan adalah dengan menggunakan baut.

3.5.1 Tegangan Nominal

Perencanaan sambungan didasarkan atas kelakuan pada saat hampir hancur, bukan kelakuan pada beban kerja. Dalam praktek, ragam kehancuran yang mungkin terjadi dipakai untuk menghitung tegangan. Tegangan yang dipakai dalam perhitungan perencanaan disebut *tegangan nominal*.

Pendekatan tegangan nominal yang digunakan dalam perencanaan meninjau kapasitas alat penyambung secara individual. Hal ini berarti bahwa semua alat penyambung yang sama ukuran dan bahannya dianggap memiliki kekuatan yang sama dalam pemindahan beban.

Untuk tujuan perencanaan, tegangan geser nominal f_v dan tegangan tarik nominal f_t pada baut dihitung berdasarkan luas penampang baut nominal.

$$f_v = \frac{P}{m \left(\frac{\pi^2 D}{4} \right)} \quad (3.22)$$

$$f_t = \frac{P}{\left(\frac{\pi^2 D}{4} \right)} \quad (3.23)$$

di mana : P = beban per baut

D = diameter baut nominal

m = jumlah bidang geser yang berperan (tunggal atau ganda)

Tegangan tumpu nominal f_p dihitung berdasarkan diameter nominal dan tebal pelat.

$$f_p = \frac{P}{Dt} \quad (3.24)$$

di mana t = tebal pelat

3.5.2 Kekuatan Geser

Umumnya tegangan geser nominal yang diijinkan F_v untuk sambungan adalah:

$$F_v = \beta_1 \beta_2 \beta_3 (F_v \text{ Dasar}) \quad (3.25)$$

dengan β_1 , β_2 , dan β_3 adalah faktor daya layan (serviceability) yang berkaitan dengan daya tahan gelincir dari sambungan. Menurut AISC, F_v Dasar untuk sambungan adalah 30 ksi (207 Mpa) untuk baut A325 dan 40 ksi (276 Mpa) untuk baut A490. Bila tidak ada ulir pada bidang geser, luas penuh A_b pada tangkai baut dianggap efektif. Bila ulir berada pada bidang geser, maka luas tegangan tarik harus dipakai. Agar luas baut nominal A_b dapat digunakan dalam semua perhitungan, F_v Dasar harus diperkecil menurut rasio luas tegangan tarik dengan luas baut nominal (sekitar 0,7). Jadi F_v Dasar adalah 21 ksi untuk baut A325 dan 28 ksi untuk baut A490.

Filosofi perencanaan sambungan ditujukan untuk menghasilkan perencanaan yang seimbang, dimana kekuatan geser baut disamakan dengan kekuatan tarik pada penampang netto dari plat.

Disamping kekuatan tarik plat pada penampang netto kritis dan kapasitas geser alat penyambung harus memadai, kekuatan tumpu bahan plat juga harus memadai untuk mencegah kehancuran. Setelah menggelincir, tangkai baut akan mendesak sisi lubang. Jika daya tahan plat tidak memadai, lubang akan membesar atau alat penyambung dapat mengoyak ujung plat.

Jarak ujung yang diperlukan untuk mencegah terkoyaknya plat dapat ditentukan dengan menyamakan kekuatan geser bahan plat dan beban yang disalurkan oleh baut ujung.

$$L_e \geq \frac{2P}{F_u t} \quad (3.26)$$

dengan L_e adalah jarak dari pusat suatu alat penyambung ke tepi terdekat dari alat penyambung yang bersebelahan atau ke tepi bagian yang disambung dalam arah gaya.

Jarak minimal antar baut adalah $2,67D$.

3.5.3 Sambungan Tipe Geser

Bila daya tahan gelincir terhadap beban kerja diperlukan, sambungan tipe geser harus digunakan. Secara umum, baik kekuatan maupun daya layan dapat ditinjau dalam perencanaan dengan pendekatan tegangan geser nominal. Persamaan 3.5.2.1 berlaku baik untuk sambungan tahan gelincir maupun tidak tahan gelincir:

$$F_v = \beta_1 \beta_2 \beta_3 (F_v \text{ Dasar}) \quad (3.27)$$

Harga yang diijinkan untuk sambungan tipe tumpu adalah harga $F_v \text{ Dasar}$. Bila daya tahan terhadap gelincir diperlukan, harga β_1 , β_2 dan β_3 harus digunakan;

β_1 adalah faktor yang berkaitan dengan kemungkinan gelincir ; β_2 adalah faktor yang berhubungan dengan metode pemasangan; dan β_3 adalah faktor fabrikasi yang terutama berhubungan dengan ukuran lubang.

Untuk menentukan harga β_1 , β_2 dan β_3 yang sesuai, dapat dilihat dalam buku “*Guide*” (Fisher dan Struik). Sebagai contoh, untuk baut A325 dan kondisi permukaan yang *bersih dari kotoran* (kelas A), harga β_1 adalah 0,59 untuk kemungkinan gelincir 5% dan 0,68 untuk kemungkinan gelincir 10%. Harga β_2 yang disarankan adalah 1,0 untuk metode putaran mur dan 0,85 untuk metode kunci yang dikalibrasi. Faktor β_3 yang berkaitan dengan ukuran lubang disarankan sebesar 1,0 untuk lubang standar dan 0,7 untuk lubang yang kebesaran (oversize) dan lubang lonjong (slotted holes).

Kapasitas Ijin Baut

- Berdasarkan Geser

$$R_{DS} = F_v \text{ dasar} \times A \text{ (geser tunggal)} \quad (3.28)$$

$$= 2 \times F_v \text{ dasar} \times A \text{ (geser ganda)}$$

$$A = \text{Luas penampang baut}$$

- Berdasarkan Tumpu

$$R_B = F_p Dt = 1,5 F_u Dt \quad (3.28)$$

$$D = \text{Diameter lubang}$$

$$t = \text{Tebal pelat}$$

AISC mensyaratkan bahwa kekuatan sambungan untuk tipe geser tidak boleh melampaui kekuatan sebagai sambungan tipe tumpu. Berdasarkan ketentuan tersebut, maka kapasitas ijin baut harus dihitung baik berdasarkan geser maupun berdasarkan tumpu. Harga yang terkecil akan dipakai sebagai nilai kapasitas baut di dalam perencanaan sambungan.

