

Ir. Oentoeng

KONSTRUKSI BAJA



LPPM

Universitas Kristen PETRA Surabaya



Penerbit ANDI Yogyakarta

TIS GUMI SARDUSO Srd.
fe

KONSTRUKSI BAJA

Ir. Oentoeng

Diterbitkan Atas Kerjasama



LPPM
Universitas Kristen PETRA Surabaya



Penerbit ANDI Yogyakarta

Konstruksi Baja

Oleh: Ir. Oentoeng

*Hak Cipta © 1999 pada penulis,
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
dalam bentuk apapun, tanpa izin tertulis dari penulis.*

*Edisi Pertama,
Cetakan Pertama, 1999
Cetakan Kedua, 2000*

Penerbit:
*Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
Universitas Kristen PETRA Surabaya*

*dan
ANDI
Jl. Beo 38-40,
Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax (0274) 588282
Yogyakarta 55281*

*Percetakan:
ANDI OFFSET
Jl. Beo 38-40,
Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax (0274) 588282
Yogyakarta 55281*

Perpustakaan Nasional: Katalog Dalam Terbitan

Oentoeng
*Konstruksi Baja/oleh Oentoeng - Ed. 1. Cet. 2
- Yogyakarta: Andi, 2000
viii + 330 hlm. ; 16 x 23 cm*

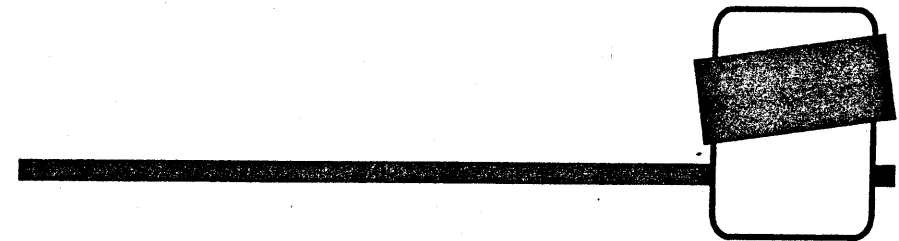
*Diterbitkan atas kerja sama Lembaga Penelitian dan
Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Kristen
Petra Surabaya*

ISBN: 979-533-406-9

1. Konstruksi Baja
1. Judul

693.71

Buku ini rasanya tidak akan terwujud bila tanya adanya bantuan dari teman-teman dosen dan para mahasiswa tingkat akhir Universitas Kristen Petra Jurusan Teknik Sipil. Dalam kesempatan ini kami ucapkan terimakasih kepada bapak ibu dosen yaitu Ibu Ir. Liliana Prayogo dan Bapak Ir. Seng Klan yang telah memberikan saran-saran dan mengoreksi buku ini. Juga kami ucapkan terimakasih kepada Saudara Albert S. yang telah menyelesaikan pengetikannya serta kepada Saudara Htmawan yang telah menyelesaikan gambar-gambarnya.



PENDAHULUAN

Dalam buku ini kami bahas elemen-elemen Struktur Baja beserta alat-alat penyambungannya untuk keperluan perencanaan bangunan gedung.

Mengenai Plate Girders tidak dibahas disini, karena biasanya Plate Girders banyak dipakai pada perencanaan jembatan. Perilaku baja mengalami beberapa tahapan, yaitu tahapan Elastis, tahapan Plastis dan tahapan Strain Hardening, tetapi buku ini hanya membahas tahapan yang pertama, yaitu tahapan Elastis, atau disebut Metode Elastis, yang telah berjalan lebih dari 100 tahun hingga sekarang.

Dalam peninjauan Metode Elastis ini, perencanaannya didasarkan atas tegangan yang diizinkan (*Allonable Stres Design* disingkat *ASD*).

Buku ini berpedoman terutama pada PPBBI 83 (Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia). Namun ada beberapa yang mengacu pada AISC (American Institute of Steel Construction), pada BS (British Standard Institution) dan pada peraturan Belanda/Jerman.

Semoga buku ini dapat dengan mudah dimengerti terutama bagi mahasiswa S₁ Jurusan Teknik Sipil dan para peminatnya. Tiada gading yang tak retak. Kiranya demikian juga dalam buku ini. Mungkin masih ada kesalahan-kesalahan yang tak terhindarkan. Kami harapkan kritik dan saran dari para pembaca sekalian.



DAFTAR ISI

PENDAHULUAN	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I Pengenalan Bahan Baja	1
BAB II Bentuk Baja Profil	25
Bab III Batang Tarik	27
Bab IV Alat Sambung	39
Bab V Batang Tekan	61
Bab VI Profil Gabungan (Profil Tersusun)	77
Bab VII Balok Terlentur	107
Bab VIII Sambungan Momen Dengan Paku Keling/Baut	145
Bab IX Sambungan Yang Memikul Momen Tegak Lurus Bidang Sambungannya	157
Bab X Framed Connection Dan Seat Connection	179
Bab XI Torsi Murni (Pure Torsion) (Saint Venant's Torsion)	195
Bab XII Warping Torsion Dan Kip	203
Bab XIII Beam Column	223
Bab XIV Perhitungan Pelat Kaki, Baut Angker Dari Kolom	265
Bab XV Sambungan Dengan Las	279
Bab XVI Baut Mutu Tinggi (High Strength Bolt)	301
Bab XVII Pelat Simpul	313
Bab XVIII Web Buckling Dan Web Crippling	321
DAFTAR PUSTAKA	329



BAB

I

PENGENALAN BAHAN BAJA

Sampai sekitar tahun 1960 sebagian besar bangunan di USA memakai baja konstruksi Carbon Steel yang menurut ASTM (*American Society for Testing Materials*) ditandai dengan A7 yang mempunyai minimum *Yield Stress* 33 ksi (1 ksi = 1.000 psi). Selain itu masih ada baja konstruksi lainnya, seperti Low-alloy (A242) yang tahan terhadap karat dan baja yang lebih mudah dilas yaitu A373. Namun demikian baja-baja yang disebut terakhir ini jarang dipakai untuk bangunan gedung. Biasanya baja semacam itu dipakai untuk jembatan. Para perencana biasanya menghendaki baja yang dapat mempertinggi tegangan (*strength*) daripada menambah ukuran bahan.

Beberapa jenis baja konstruksi sekarang ada yang tahan terhadap korosi. Baja semacam ini dapat melakukan oksidasi untuk membentuk lapisan penahan yang padat yang dapat menghalang-halangi oksidasi lebih lanjut. Dengan demikian dengan menggunakan baja jenis ini mungkin menjadi lebih murah, walaupun harganya pasti lebih mahal dari baja biasa, karena tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang terus-menerus seperti halnya pada baja biasa yang memerlukan pengecatan kembali untuk mencegah munculnya karat.

Untuk keperluan disain dipakai yield stress guna mendapatkan *allow-able unit stress* (tegangan ijin) dari berbagai tipe batang yang dibebani.

Dalam buku ini hanya dibahas keadaan elastis untuk mendesain. Istilah yield stress, yaitu tegangan yang terjadi pada *yield point* dalam PPBBI disebut sebagai Tegangan Leleh (σ_1). Ada juga yang menyebutnya sebagai *Yield Strength*.

Yield Stress = Yield Strength, apabila ditinjau hanya sampai pada batas keadaan elastis.

Dalam tahun 1971 telah digunakan baja dengan Yield Stress mulai dari 24 ksi sampai 100 ksi.

CARBON STEEL

Carbon Steel adalah baja yang terdiri dari elemen-elemen yang prosentase maksimum selain bajanya sebagai berikut:

- 1. 70% Carbon
- 1. 65% Manganese
- 0. 60% Silicon
- 0. 60% Copper

Carbon dan Manganese adalah bahan pokok untuk meninggikan tegangan (strength) dari baja murni.

Baja dikategorikan berdasarkan material, ialah dari *Ingot Iron* (baja bongkah) tanpa Carbon sama sekali, sampai *Cast Iron* (baja tuang) yang mempunyai Carbon sekurang-kurangnya 1,70%.

Baja ini dibagi menjadi 4 kategori (berdasarkan Carbon yang di-kandung):

1. Low Carbon (mengandung Carbon kurang dari 0,15%)
2. Mild Carbon (mengandung Carbon 0,15%-0,29%)
3. Medium Carbon (mengandung Carbon 0,30%-0,59%)
4. High Carbon (mengandung Carbon 0,60%-1,70%)

Structural Carbon Steel (Baja Carbon untuk konstruksi) adalah termasuk kategori Mild Carbon.

Penambahan prosentase Carbon akan mempertinggi Yield Stress tetapi akan mengurangi daktilitasnya (*ductility*). Pengurangan daktilitas akan menambah problem-problem pada pengelasan. Pengelasan akan ekonomis dan memuaskan bila baja mengandung Carbon tidak lebih dari 0,30%.

A36 : Structural Steel ($F_y = 36$ ksi) ≈ 2500 kg/cm².

Baja konstruksi ini menggantikan A7 sejak tahun 1960. Baja A36 mempunyai Carbon maksimum antara 0,25% - 0,29%. A36

dibatasi sampai dengan tebal 8 inch. Bila lebih tebal dari 8 inch mempunyai min $F_y = 32$ ksi ≈ 2200 kg/cm². A36 biasanya merupakan pilihan terbaik, bila rasio *strength to weight* dianggap tidak penting dan yang diinginkan ialah besarnya kekakuan (*stiffness*). A36 mudah dilas dan dibaut. A36 ini banyak dipakai pada konstruksi bangunan dan jembatan di USA.

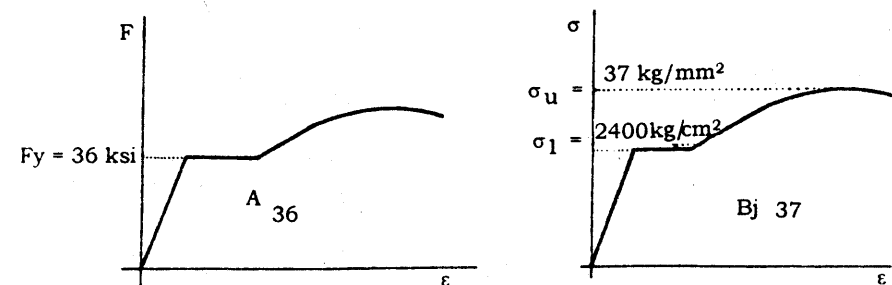
PERBANDINGAN ANTARA A36 DENGAN Bj 37

Dapat dilihat pada Tabel 1 halaman 6 PPBBI, besarnya tegangan leleh untuk Bj 37 = 2400 kg/cm².

Dibanding dengan tegangan leleh A36 yang terletak di antara 2200-2500 kg/cm², tampak bahwa harga σ_1 Bj 37 terletak dalam range tegangan leleh A36, sehingga A36 dan Bj 37 \approx sama.

Perlu diketahui bahwa yang dimaksud dengan baja A36 ialah bahwa baja tersebut mempunyai tegangan leleh $\sigma_1 = 36$ ksi, sedangkan Bj 37 mempunyai tegangan ultimate $\sigma_u = 37$ kg/mm² = 3700 kg/cm² (σ_u = tegangan ultimate).

Perbandingan diagram tegangan-tegangan antara kedua macam baja ini dapat dilihat sebagai berikut:

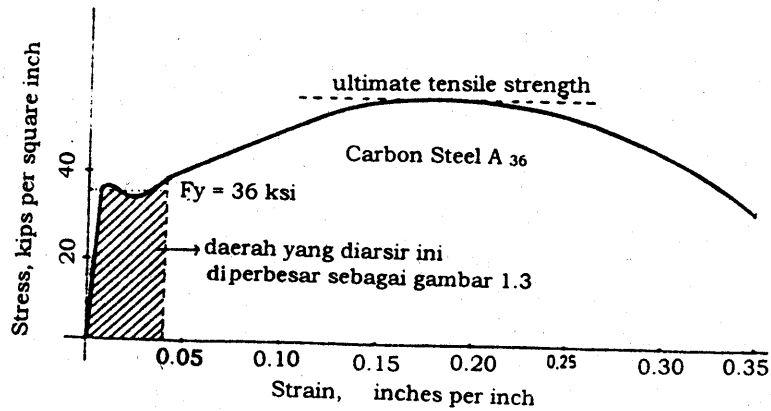


Gambar 1.1

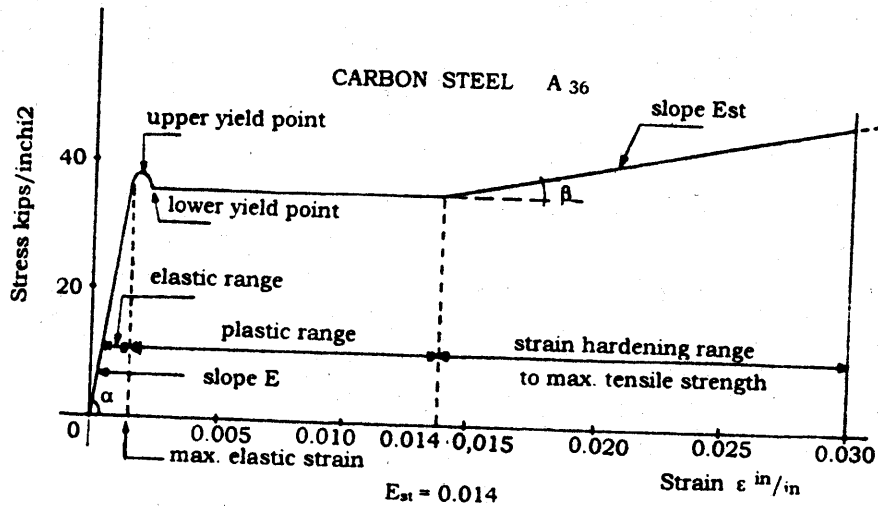
Pada umumnya, di Indonesia, baik untuk bangunan gedung maupun jembatan, banyak dipakai Bj 37 ini. Jelasnya A36 mempunyai $\sigma_1 = 36$ ksi dan Bj 37 mempunyai $\sigma_u = 37$ kg/cm².

Jadi AISC berdasarkan tegangan lelehnya, sedangkan Bj 37 berdasarkan tegangan ultimatnya.

Ditinjau diagram tegangan-regangan dari A36



Gambar 1.2: Typical Stress - Strain Curves



Gambar 1.3: Stress-strain curves daerah yang diarsir pada Gambar 1.2

Penjelasan tentang stress strain curve:

(gambar 1.2: - Adalah diagram tegangan-regangan Carbon steel dan A36 dari batang yang ditarik aksial.

(gambar 1.3: - Untuk batang yang ditekan aksial, hasil diagram tegangan-regangannya akan sama dengan yang ditarik aksial, asalkan pengaruh tekuk batang dihilangkan dengan memberikan penahan terhadap meleuknya batang.

- Dalam percobaan batang tarik, dengan menambah beban terus-menerus sampai batang patah, hasil diagram tegangan-regangannya dapat dilihat pada Gambar 1.2.
- Batang ditarik sampai mencapai *yield point* (titik leleh) dengan tegangan lelehnya sebesar $F_y = 36$ ksi.
- Setelah mencapai titik leleh, tegangan (*stress*) tidak berubah besarnya, tetapi regangannya (*strain*) bertambah sampai mencapai $\epsilon_{st} = 0,014$ (*Strain hardening strain*).
- Stress 0 - 36 ksi merupakan garis lurus dengan slope:

$$E = \frac{\text{stress}}{\text{strain}} = \text{konstan} = 2.900 \text{ ksi}$$

$$\approx 2.050.000 \text{ kg / cm}^2$$

$$(E = \text{tg } \alpha)$$

dibandingkan dengan Bj 37 yang mempunyai $E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$.

E disebut Modulus Elastis = *Young's Modulus*.

Umumnya semua mutu baja mempunyai E yang sama. Selama tegangan yang terjadi belum mencapai $F_y = 36$ ksi bila beban dilepas, batang akan kembali seperti semula (panjang batang tidak berubah, tidak ada *residual strain*), tidak ada pertambahan panjang yang menetap (sesuai dengan Hukum Hooke).

Ini berarti bahwa batang dalam keadaan elastis. Daerah antara strain = 0 dan maksimal elastis

strain merupakan daerah elastis (*Elastis range*).

Lihat Gambar 1.3.

- Setelah mencapai stress = 36 ksi, tegangannya (stress) akan tetap tidak berubah, tetapi strainnya (ϵ) bertambah sampai mencapai $\epsilon_{st} = 0,014$ (ϵ_{st} = Strainhardening strain). Daerah ini disebut daerah plastis (*plastic range*).

Lihat Gambar 1.3.

Di sini terjadi strain hardening modulus (E_{st}). $E_{st} = tg \beta = 900$ ksi.

Naiknya tegangan dan regangan kemudian tidak lagi berbanding lurus, melainkan merupakan lengkungan hingga mencapai tegangan ultimate (*ultimate tensile strength*). Lihat Gambar 1.2.

Di sini batang masih belum patah karena batang tersebut masih mempunyai kemampuan ulur. Batang baru akan patah setelah mencapai $\epsilon = 0,35$.

Daerah melebihi $\epsilon_{st} = 0,014$ disebut *strain hardening range*.

Mata kuliah Baja I dibatasi hanya menggunakan metode *Elastic Design* (dalam batas *Elastic range*). Selain metode elastis ini, ada metode *Plastic design* yang diberikan pada kuliah Konstruksi Baja II (pemakaian sampai dengan *plastic range*).

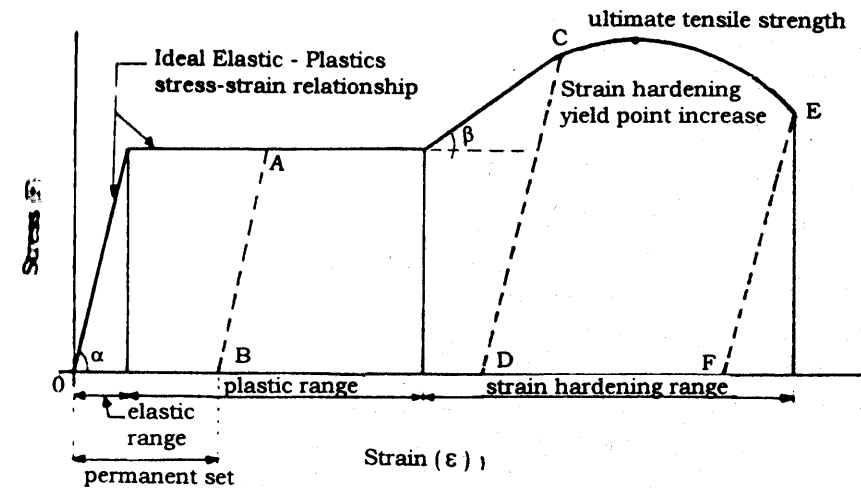
DUCTILITY (DAKTILITAS)

Daktilitas dapat didefinisikan sebagai banyaknya *permanent strain*. Untuk baja A36, misalnya, mempunyai daktilitas sebanyak strain sampai batang patah.

Daktilitas adalah penting, karena ia mengijinkan *locally high stress* (konsentrasi tegangan) untuk didistribusikan.

Prosedur perencanaan selalu didasarkan atas *ultimate strength behaviour* yang membutuhkan kesatuan daktilitas yang besar, terutama untuk memperbaiki tegangan-tegangan dekat lubang atau perubahan yang mendadak pada bentuk batang seperti untuk perencanaan sambungan.

STRAIN HARDENING



Gambar 1.4: Effect of straining beyond the elastic range

Gambar 1.4:

- Menunjukkan kelakuan baja secara idealisasi. Diagram tegangan-regangan ini disebut *Engineering stress strain curve*.
- Selama pembebanan hanya sampai σ_1 , bila beban dilepaskan maka batang akan kembali ke keadaan semula (kembali ke titik O). Batang dalam keadaan elastis.
- Bila beban telah melampaui yield point dan sampai ke titik A beban dilepas, maka akan ada strain yang tinggal (*residual strain*) sebesar OB. Dalam keadaan ini kapasitas daktilitasnya berkurang menjadi sebesar BF. Pembebanan kembali memperlihatkan kelakuan seperti stress strain mula-mula, tetapi dengan permulaan terletak pada titik B, sehingga daerah plastis yang mendahului strain hardening juga berkurang.
- Jika batang dibebani lagi (mulai dari B) hingga mencapai titik C, pembebasan beban kemudian akan mengikuti garis strip-strip CD sampai titik D.

- Sebagai pengaruh strain hardening, menunjukkan titik leleh (yield point) C dengan σ_1 yang lebih besar dari σ_1 mula-mula. Titik C adalah strain hardening yield point. Dalam hal ini kapasitas daktilitas tinggal sebesar DF.
- Tampak bahwa proses pembebanan di luar elastic range menyebabkan perubahan pada daktilitasnya.

COLD WORK

Proses pembebanan di luar elastic range menyebabkan perubahan dalam daktilitasnya yang berguna, jika digunakan dalam temperatur atmosfer. Proses semacam ini dikenal sebagai *Cold Work*.

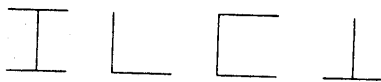
Bila dari suatu pelat dibuat bentuk struktur dengan *cold forming* pada temperatur atmosfer, maka akan terjadi *inelastic deformation* (residual strain) pada pembengkokan.

Cold forming dalam strain hardening range pada lokasi bengkokan menambah yield strength, yang dalam desain boleh diperhitungkan, misalnya *Light Gage Steel*

Catatan:

Perbedaan Hot rolled steel dengan Cold form steel:

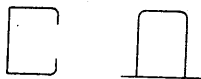
- Profil-profil biasa seperti:



merupakan Hot-rolled steel.

Dibuat di pabrik dengan pemanasan.

- Profil-profil seperti :

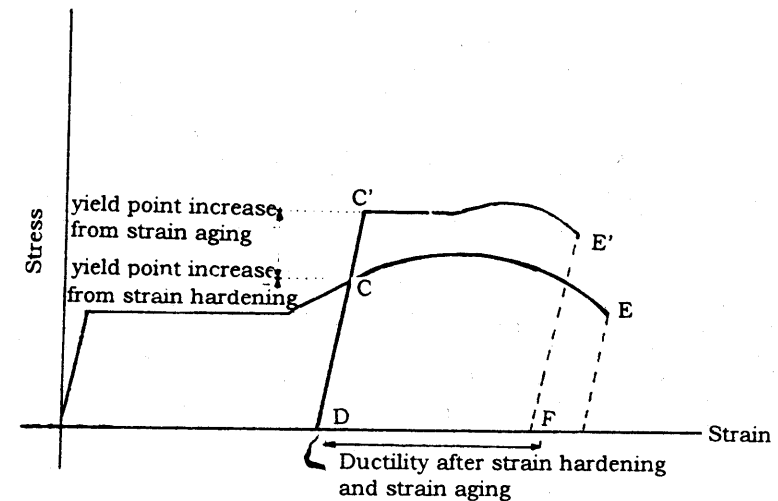


dan sebagainya merupakan Cold form steel.

Membentuk suatu pelat menjadi bentuk struktur seperti tergambar dalam keadaan dingin (dalam temperatur atmosfer).

STRAIN AGING

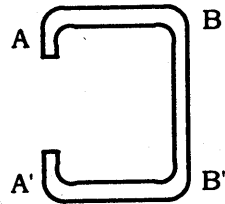
Mengenai strain aging ini dapat dilihat gambar berikut:



Gambar 1.5: Effect of strain aging after straining into strain hardening range and unloading

- Tampak bahwa pertambahan dalam strength diperoleh dengan biaya daktilitasnya. Dengan hilangnya batas yield point yang orisinal (yield point C), terbentuk yield point yang baru (yield point C') disertai tegangan yang konstan dari plastic range yang baru.
- Setelah pembebanan beban hingga mencapai titik D, setelah dibiarkan beberapa waktu, dengan pembebanan kembali (mulai titik D), maka akan didapatkan data-data yang berlainan seperti yang digambarkan oleh titik D, C dan E pada Gambar 1.4, dengan fenomena yang dikenal sebagai *Strain aging*.
- Strain aging seperti terlihat pada Gambar 1.5 menghasilkan tambahan kenaikan yield point, memperbaharui daerah plastic dengan stress yang konstan dan memberikan daerah strain hardening yang baru dengan stress (tegangan) yang menanjak.
- Tampak bentuk stress-strain diagram yang asli diperbaharui, tetapi daktilitasnya dikurangi (menjadi DF).

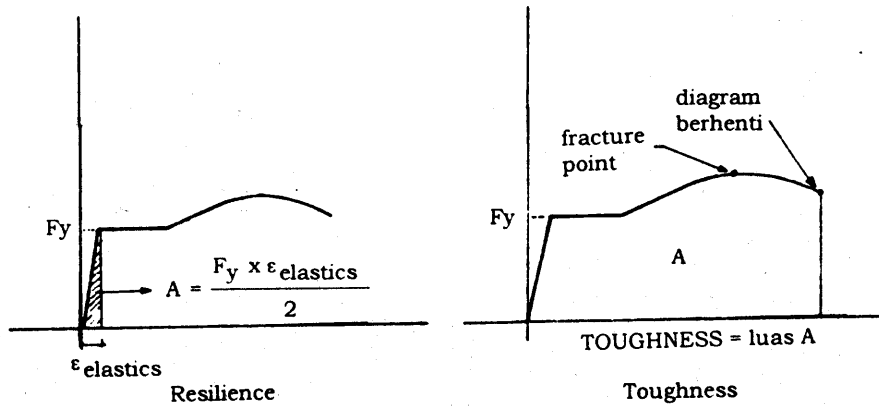
- Stress-strain diagram yang baru ini dapat dipakai seperti keadaan yang orisinil untuk analisis Cold-formed Section, selama daktilitas yang tinggal adalah cukup.



Daerah-daerah sudut pembungkakan pelat dari cold-formed shapes (A, A', B dan B') tidak memerlukan daktilitas yang besar untuk *rotational strain* terhadap sumbu dari pembungkakan.

TOUGHNESS DAN RESILIENCE

Toughness dan resilience adalah ukuran dari kemampuan baja untuk menghisap *mechanical energy*. Besaran ini dapat diperoleh dari *tension test curve* seperti yang tampak pada Gambar 1.2.



Gambar 1.6

Resilience : menunjukkan *elastic energy absorption* (tenaga penyerap elastis) dari bahan. Kadang-kadang ditunjukkan sebagai *modulus of resilience*. Resilience adalah banyaknya elastic energy yang dapat diserap oleh satu satuan volume dari bahan yang dibebani tarikan = luas daerah stress-strain diagram sampai yield stress (luas bagian yang diarsir = A).

Toughness: menunjukkan total energy kedua elastis dan inelastis, yang dapat diserap oleh satu satuan volume dari bahan sebelum kehancurannya = luas daerah di bawah tension stress-strain curve melebihi *fracture point* di mana diagram berhenti (=A).

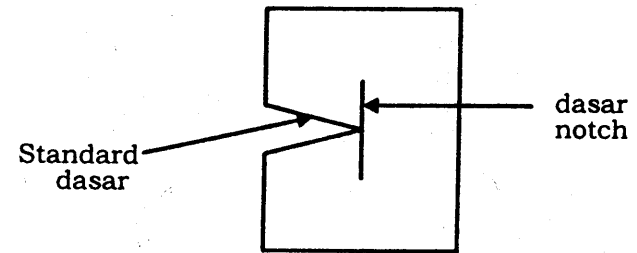
Untuk Carbon steel A36 mempunyai:

Resilience = 22 inch pounds/in³

Toughness = 12000 inch pounds/in³

Kenyataan *uniaxial tension* (tarikan axial yang merata) jarang terdapat pada struktur yang sebenarnya. Lebih-lebih pada daerah sambungan, maka dipakai *Indeks of Toughness* yang lebih praktis yang didasarkan atas kondisi tegangan yang lebih kompleks (kemungkinan triaksial) di bawah dasar dari suatu takikan (*notch*).

Notch Toughness adalah suatu term yang dipakai untuk melukiskan penahanan dari baja dan penyebaran *crack* pada dasar dari standar notch. Notch toughness ini diukur dengan *Charpy V-Notch test*.



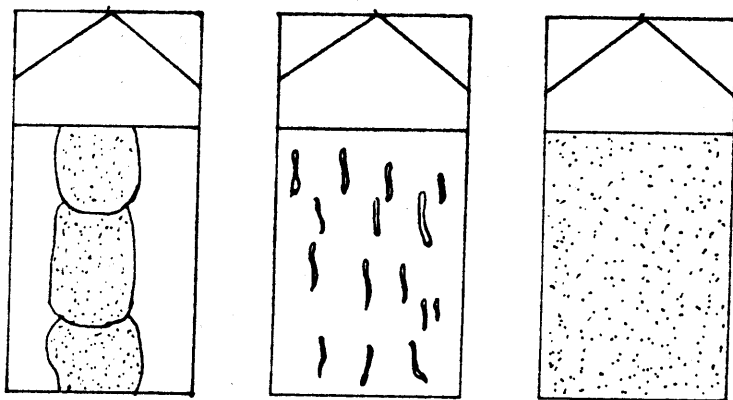
Charpy V-notch test ini menggunakan batang bertampang persegi yang kecil sebagai *sample supported beam* dengan V-notch di tengah-tengah panjang batang. Batang kemudian patah oleh tiupan dari bandul yang berayun (*swinging pendulum*). Jumlah energi yang diserap dihitung dari ketinggian bandul yang bertambah setelah benda uji patah.

Charpy V-notch test dipakai secara luas untuk menentukan *transition temperatur* dari *brittle* ke *ductile behaviour* (kelakuan ductile). Selain itu juga dipakai untuk menguji kemunculan *fracture surface*.

FRACTURE (RETAK)

Jika temperatur berkurang maka yield stress dan tensile strength dari baja konstruksi pada umumnya menjadi naik. Sebaliknya, daktilitas akan berkurang dengan berkurangnya temperatur.

Biasanya pada temperatur di bawah mana benda uji mengalami tensile stress (tegangan tarik), dapat mengakibatkan *Fracture by cleavage*. Di sini tampak hanya sedikit atau tidak ada sama sekali deformasi plastis. Hal ini berlawanan dengan terjadinya *Shear failure* yang biasanya didahului oleh sejumlah deformasi.



Gambar 1.7

Keterangan:

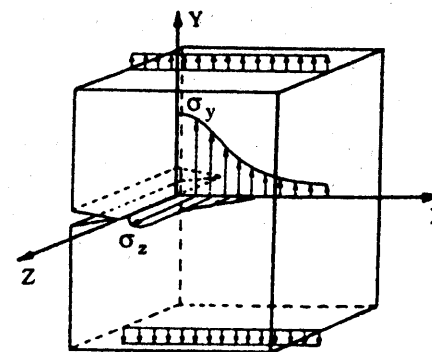
- Ductile fracture surface with shear lip
- Transition fracture surface
- Brittle surface with cleavage fracture

Fraktur yang terjadi oleh cleavage biasanya ditunjukkan sebagai *brittle failures* dan ditandai oleh penyebaran retak-retak (*cracks*) pada kecepatan yang sangat tinggi. Di sini kenyataan adanya plastic flow yang hanya sedikit dan sering tampak fracture surfacenya yang merupakan granular (butir-butir) kecuali pada bagian yang tipis sepanjang tepinya (Gambar 1.7c).

Brittle fractures dapat terjadi pada tegangan yang relatif rendah yang disertai lain-lain kondisi tertentu, seperti:

- FLAW (a fatigue crack or fabrication crack due to punched holes, etc.)
- Tegangan tarik dengan intensitas yang cukup untuk menyebabkan deformasi kecil pada retak atau pada notch tip (ujung takikan).
- Baja dengan toughness yang rendah yang menimbulkan cleavage fracture pada ujung takikan (a low service temperature will further aggravate this condition).

Untuk mengerti brittle fracture, orang harus melihat pada pengaruh dari *Stress concentrations* disertai oleh *constraints* (paksaan) yang mencegah plastic distribution dari tegangannya. Keadaan ini terdapat pada batang yang ditakik yang dibebani secara aksial seperti gambar berikut:



NOTE: σ_y induces σ_z and σ_x stress. The latter one is not shown in the figure.

Gambar 1.8: State of stress at the root of notch under uniaxial loading

Pengaruh stress concentration dari notch atau crack tip menyebabkan longitudinal stresses yang tinggi pada puncak dari notch

dan *longitudinal stress* yang lebih rendah pada material yang berdekatan.

Lateral contraction (pengerutan lateral) pada arah lebar dan tebal dari material yang bertegangan tinggi pada ujung notch, ditahan oleh pengerutan lateral yang lebih kecil dari material yang bertegangan lebih rendah (*lower stressed material*). Akibatnya, tensile stresses yang terjadi dalam arah lebar dan tebalnya (x dan z) sedemikian rupa sehingga *triaxial state of stress* yang besar terdapat di dekat crack tip. Dalam keadaan ini terjadilah cleavage atau brittle type failure.

Biasanya Charpy V-notch test digunakan untuk mengevaluasi sifat mudah terpengaruh (*susceptibility*) dari baja oleh brittle fracture.

Perhatian khusus harus diberikan kepada desain dan *fabrication details* dari pemasangan sambungan demikian agar brittle fractures dapat dihindari.

Salah satu dari detail yang kritis pada konstruksi dengan baut dan paku keling adalah lubangnya. Memukul lubang akan menyebabkan strain aging dan work hardening dari bahan sekeliling lubang. Dapat terjadi *minute cracks radiating* dari lubang dan pada takikan daerah yang mempunyai tegangan tarik yang tinggi.

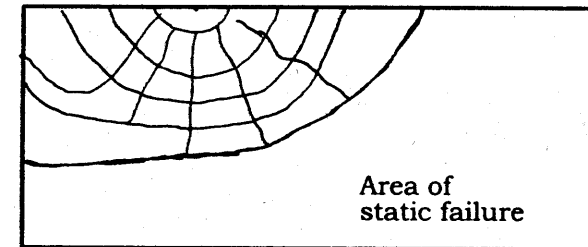
Untuk mengeliminasi titik-titik potensial dari crack ini, lubang yang dipukul itu harus diperbesar untuk menghilangkan work-hardened material, jika mungkin dapat mengakibatkan brittle fracture di bawah *service load*.

FATIGUE (LELAH)

Banyak bagian-bagian konstruksi harus memikul beban berulang yang cepat. Pengalaman menunjukkan bahwa bagian-bagian konstruksi dan sambungan dapat hancur akibat *fatigue* atau pertumbuhan crack yang stabil, meskipun tegangan maksimum yang terjadi masih lebih kecil dari yield stress.

Umumnya kehancuran fatigue (*fatigue failure*) bisa terjadi walaupun nominal *cyclic stress* dalam bahan jauh lebih rendah daripada *elastic limit*. Failure semacam ini umumnya menunjukkan adanya sedikit deformasi. Karena kurang deformasi maka

fatigue crack sukar untuk dideteksi sampai pertumbuhan crack (*crack growth*) sungguh-sungguh terjadi. *Fatigue fracture surface* umumnya menunjukkan penampilan dengan tiga daerah yang berbeda sebagai berikut:

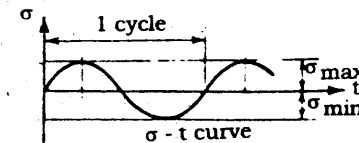


Gambar 1.9

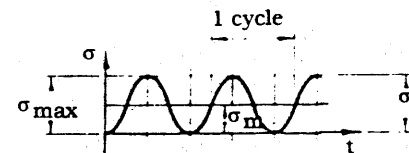
Daerah pertama mempunyai permukaan yang halus (*smooth surface*) sesuai dengan *slow stable growth* (pertambahan secara lambat dari crack yang stabil). Daerah yang kedua lebih kasar teksturnya, di mana jarak dan rata-rata *growth*-nya dari pusat *fatigue crack* bertambah.

Daerah ketiga adalah fatigue terakhir yang mungkin brittle atau *ductile*, tergantung keadaan.

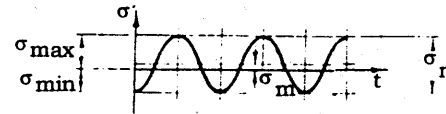
Secara skematik, perbedaan keadaan fatigue crack adalah sebagai berikut:



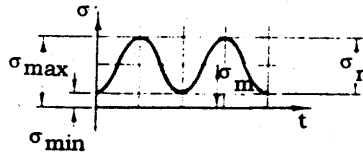
- a. Full reversal stress ratio $R = -1$



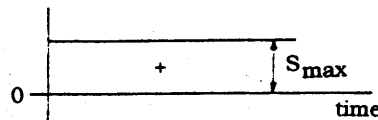
- b. Pulsating tension stress ratio $R = 0$



c. Reversing/alternating stress ratio $R < 0$



d. Fluctuating stress ratio $R > 0$



e. Static load stress ratio $R = +1$

Gambar 1.10: Types of Stress Cycles

Penjelasan:

$R = \text{ratio dari } \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ secara aljabar

Dulu orang beranggapan bahwa loading cycles ditandai oleh R dan maximum stress. Sekarang ternyata stress range adalah stress variable yang dominan yang menyebabkan crack growth.

Dari bermacam-macam stress cycles ini, biasanya yang paling berbahaya (yang paling menentukan) ialah Full reversal stress pada Gambar 1.10a.

Dari 0 ke tension max, kemudian unload ke 0, kemudian ada beban compression ke compression max (= tension max), terus unload ke 0 dan seterusnya.

$\frac{S_{\min}}{S_{\max}} = R = -1$, yang menghasilkan tegangan fatigue terendah S_{\max} (lowest fatigue strength)

Sedangkan dari stress ratio $R = +1$ (Gambar 1.10e) tidak terjadi fatigue.

Pada sambungan, fatigue crack growth biasanya dimulai pada titik di mana terjadi stress concentration, seperti lubang, takikan, fillet yang tajam dan sebagainya. Takik dan discontinue menyebabkan pengaruh kenaikan tegangan yang mendadak di sekitar takikan dan mengurangi fatigue strength.

FAKTOR ELASTIC STRESS CONCENTRATION

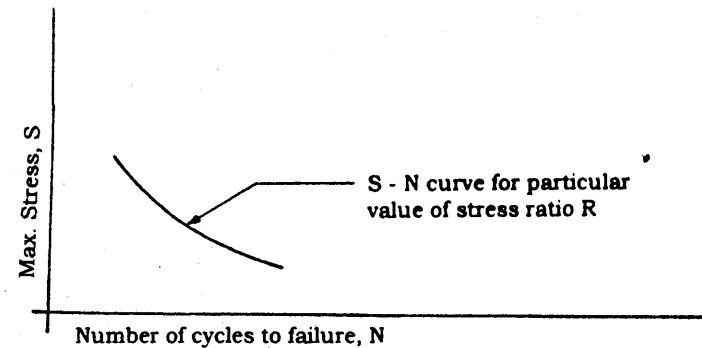
Untuk pelat yang tak berhingga lebarnya dengan lubang bulat dan memikul beban uniaxial uniform tension, pelat itu mempunyai stress concentration factor = 3. Bila lebar pelat berkurang, pertambahan faktor stress concentrationnya menjadi sangat berarti. Oleh sebab itu perubahan bentuk akan menghasilkan perubahan luas penampang melintang dan tipe load transferanya, yang akan mempengaruhi besarnya stress concentrations.

Satu-satunya cara untuk mengetahui besarnya fatigue strength adalah dengan menyelenggarakan Fatigue test. Data hasil tes dinyatakan dalam diagram S - N.

$S = \text{applied stress}$

$N = \text{number of cycles to failure}$

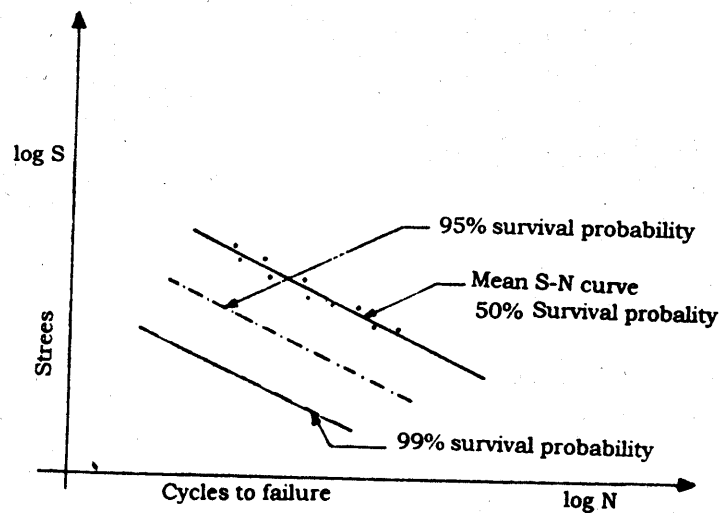
Hasil S - N curve merupakan dasar untuk melukiskan tingkah laku fatigue (fatigue behaviour) dari tipe-tipe sambungan tertentu.



Gambar 1.11

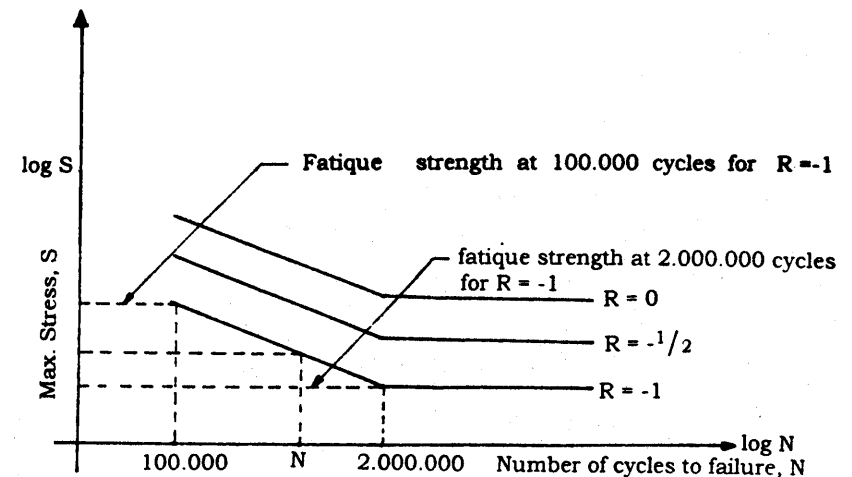
Maximum stress S yang diperoleh dari beberapa *number of cycles* N of loading (yang dinyatakan ke skala linear). Bila diketahui jumlah maksimum dari cycles sesuai dengan *stress ratio*-nya, maka fatigue strength akan dapat ditentukan. Bila sumbu koordinat N dan S ditransformasikan ke logaritma, curve $S - N$ akan berupa garis lurus seperti Gambar 1.12.

- Garis lurus yang penuh ini merupakan 50% *survival probability* dari semua benda uji.
- Batas toleransi dari $S - N$ curve terdapat dari variasi dan survival probability.
- Tingkah dari survival probability yang diinginkan dapat dipakai untuk mengembangkan *desain stresses* untuk setiap jumlah dari *Applied Stress cycles*.



Gambar 1.12

Typical $S - N$ curve (approximation by straight lines) of several stress ratios plotted to log scale sebagai berikut:



Gambar 1.13

Penjelasan:

- Jika kurva mencapai stress yang konstan yang tidak tergantung pada jumlah cycles dari beban, tegangan tersebut menunjukkan bahwa fatigue tidak dipertimbangkan. Bila lebih besar dari 100.000 *cycles of loading*, maka menunjukkan fatigue limit atau endurance limit. Hal ini biasanya terjadi pada kira-kira 2.000.000 *cycles of loading*. Selama bangunan mengalami 100.000 *cycles of loading* atau kurang, biasanya fatigue harus diperhatikan dalam desain.
- Bagian garis yang miring (Gambar 1.13) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$F_n = S (N / n)^k$$

di mana:

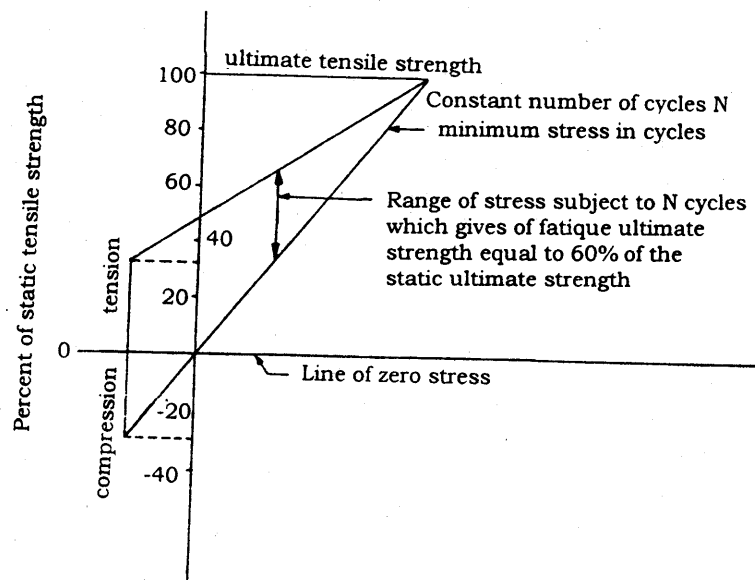
F_n = *fatigue strength computed for failure at n cycles*

S = *stress which produced failure at N cycles*

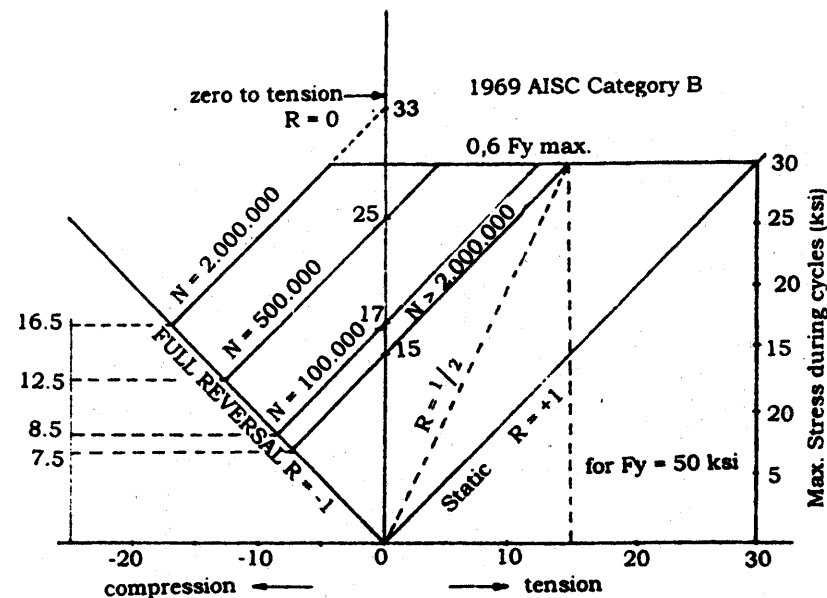
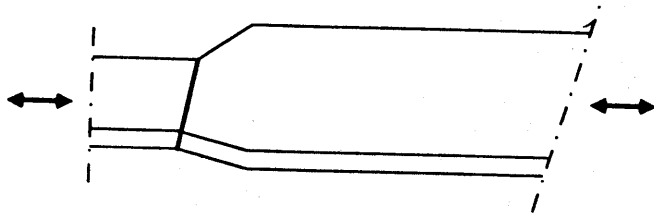
k = *slope of the best fit straight line representing the data.*

- Seperti Gambar 1.13, terlihat bahwa masing-masing stress ratio mempunyai $S - N$ curve yang berbeda.
- Biasanya untuk meringkas hasil dari bermacam-macam *types of stress cycles* dipakai Diagram Goodman (Gambar 1.14).

- Sering digunakan *modified Goodman diagram*, di mana ada pengaruh dari beberapa file cycles yang berbeda-beda untuk keperluan desain (Gambar 1.15).



Gambar 1.14: Typical Goodman diagram showing effect of various stress ratios on fatigue strength for N cycles of loading (adapted from Ref. 8 AISC)



Gambar 1.15: Modified Goodman diagram, giving 1969 AISC allowable stresses for base metal and weld metal at full penetration groove welded splices at transitions in width and thickness

Penjelasan:

Modified Goodman diagram didasarkan Stress Category B dari AISC 1969 Appendix B (Gambar 1.15).

- Elemen baja dengan $F_y = 50$ ksi di mana ada perubahan ukuran penampang dengan groove welded splices seperti Gambar 1.15.
- Maksimum tensile stress diambil = 30 ksi (allowable stress = $0,6 F_y = 0,6 \times 50 = 30$ ksi).
- Untuk *statik tension* ($R = +1$), batas atas ditunjukkan oleh garis horizontal pada $0,6 F_y = 30$ ksi.
- Untuk stress ratio (R) antara $+ \frac{1}{2}$ dan $+1$, tidak ada pengaruh fatigue, misalnya sepanjang minimum stress tidak kurang dari $+ \frac{1}{2}$ maksimum stress dan mempunyai tanda yang sama.

- Jika stress ratio kurang dari $+ \frac{1}{2}$, diperlukan beberapa *fatigue reduction*, jika banyaknya cycles N melebihi 2.000.000.
- Garis miring yang memotong $R = 0$ pada 15 ksi, menunjukkan bahwa diijinkan stress variation dari 15 ksi, jika $N > 2.000.000$.
- Tampak bahwa pada full reversal ($R = -1$), stressnya berkisar antara 7,5 ksi in tension dan 7,5 ksi in compression.
- Mekanisme dari fatigue ini sebenarnya masih belum seluruhnya dimengerti tetapi diketahui sangat dekat hubungannya dengan faktor yang berhubungan dengan duktilitas. Lebih-lebih mengenai las, yang dapat memberi pengaruh yang dramatis pada fatigue strength.

TEGANGAN RUANG

Dalam kebanyakan struktur desain, yielding dalam struktur yang sebenarnya adalah tidak seperti benar-benar yang terlihat pada tingkah laku dalam percobaan tarikan.

Ditinjau dalam keadaan ruang, tegangan idealnya dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 + 3\tau_{zx}^2)}$$

- Dari kebanyakan structural design, salah satu dari principle stresses adalah $= 0$ atau sangat kecil, hingga dapat diabaikan. Dengan demikian *semua tegangan bekerja berada pada satu bidang datar*, sehingga tegangan idealnya dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2)} \quad (\text{dalam 1 bidang datar})$$

- Bila $\sigma_y = 0$, maka:

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)}$$

- Apabila $\sigma_x = 0$ dan $\sigma_y = 0$, (hanya ada shear stress saja) maka:

$$\sigma_i = \sqrt{3\tau_{xy}^2} \rightarrow \sigma_i = \tau_{xy} \sqrt{3}$$

atau

$$\tau_{xy} = \sigma_i / \sqrt{3}$$

- Kalau σ_i adalah σ , maka: $\tau_i = \sigma / \sqrt{3}$, $\tau_i = 0,58 \tau_i$ kalau $\tau_i = \bar{\sigma}$ maka $\bar{\tau} = 0,58 \bar{\sigma}$

Dalam pemakaian rumus-rumus di atas tegangan tarik dianggap sebagai tegangan positif.

POISSON'S RATIO

Jika tegangan dipakai dalam satu arah, strain yang disebabkan tidak hanya dalam satu arah tegangan saja yang dipakai tetapi juga yang terjadi pada dua arah yang lain, yaitu tegak lurus arahnya.

Harga μ yang biasa dipakai ialah yang diperoleh dari uniaxial stress condition, di mana merupakan ratio antara strain yang tegak lurus dengan strain yang searah beban.

Untuk baja konstruksi, Poisson's ratio-nya $\approx 0,3$ dalam elastis range dan $\approx 0,5$ dalam plastis range.

MODULUS OF ELASTICITY - SHEAR (Modulus Gelincir)

Pembebanan dalam geser murni menghasilkan stress strain curve dengan bagian garis lurus yang kemiringannya menunjukkan modulus elastisitasnya.

Jika Poisson's ratio μ dan modulus elastisitas tarik tekan E diketahui maka shear modulus G dibatasi oleh *theory of elasticity* sebagai berikut:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

di mana untuk baja konstruksi, berdasarkan AISC, adalah di atas sekitar 11.000 ksi $\approx 773.300 \text{ kg/cm}^2$.

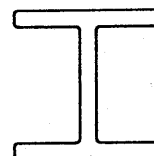
Menurut PPBBI = $0,81 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 = 810.000 \text{ kg/cm}^2$.

BENTUK BAJA PROFIL

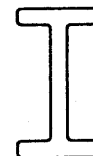
Ada 2 macam bentuk profil baja yang didasarkan cara pembuatannya, yaitu:

- Hot rolled shapes*: Di sini profil baja dibentuk dengan cara blok-blok baja yang panas diproses melalui rol-rol dalam pabrik. Hot rolled shapes ini mengandung tegangan residu (*residual stress*). Jadi sebelum batang dibebanipun sudah ada residual stress yang berasal dari pabrik.
- Cold formed shapes*: Profil semacam ini dibentuk dari pelat-pelat yang sudah jadi, menjadi profil baja dalam temperatur atmosfer (dalam keadaan dingin, ingat mengenai strain aging). Tebal pelat yang dibentuk menjadi profil di sini tebalnya kurang dari 3/16 inch. Profil macam ini ringan dan sering disebut sebagai *Light Gage Cold Form Steel*.

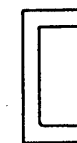
a. Standard rolled shapes



Wide Flange
shape



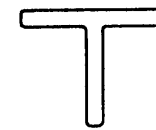
Normal
Profil



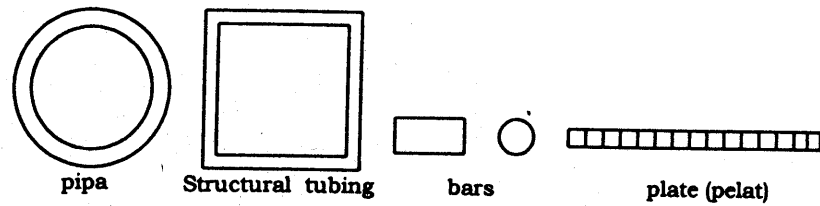
Kanal
Profil



Baja
Siku

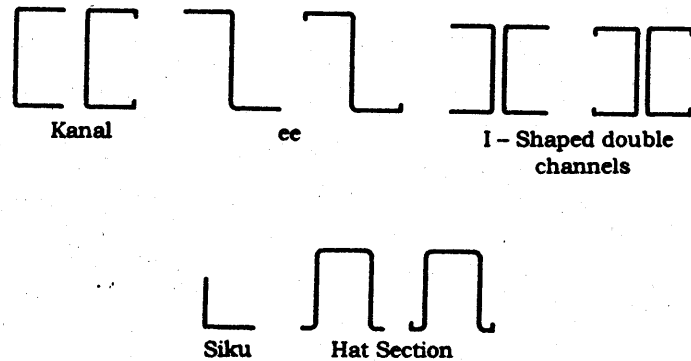


Bata T



Gambar 2.1

b. Beberapa cold formed shapes



Gambar 2.2

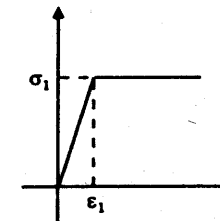
-ooOoo-

BAB

III

BATANG TARIK

- Batang tarik adalah batang yang menerima beban tarik.
- Desain untuk batang tarik merupakan persoalan yang paling sederhana dari *structural engineering*.
- Desain didasarkan atas ijin tegangan tarik (*allowable tensile stress*) di mana tegangan yang terjadi tidak boleh melampaui tegangan ijin.
- Selama stabilitas hanya sebagai persoalan sekunder, desain dari batang tarik didasarkan atas luas penampang melintang.
- Apabila ada lubang maka luas penampang melintangnya adalah luas netto (luas bruto-luas lubang).
- Untuk menahan beban berguna dipakai *factor of safety* (faktor keamanan) yang cukup terhadap kehancuran.
- Berdasarkan stress strain diagram ini, sekali semua serat telah mencapai tegangan leleh maka dianggap bahwa *ultimate capacity* telah tercapai.
- Dengan membagi ultimate load dengan faktor keamanan, diperoleh working load (beban kerja) sebagai berikut:



Gambar 3.1

$$Tu = \sigma_1 \cdot A_{net} \quad Tu = \text{ultimate capacity}$$

$$\sigma_1 = \text{tegangan leleh}$$

$$A_{net} = \text{luas penampang netto}$$

$$Tw = \frac{Tu}{Fs} = \frac{\sigma_1 \cdot A_{net}}{Fs} = \sigma \cdot A_{net} \quad \left[\frac{\sigma_1}{Fs} = \sigma \right]$$

$$Fs = \text{factor of safety}$$

$$\sigma = \text{tegangan ijin}$$

$$Tw = \text{working load}$$

- Besarnya F_s ini menurut AISC = 1,65. Sedangkan menurut PPBBI, $F_s = 1,5$. Misalnya, B37 mempunyai $\sigma_1 = 2400 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{F_s} = \frac{2400}{1,5} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

Lihat Tabel 1 PPBBI.

KEKAKUAN BATANG TARIK

Meskipun stabilitas bukan merupakan suatu kriteria untuk mendesain batang tarik, namun batang tarik perlu dibatasi panjangnya untuk menjaga agar batang jangan terlalu fleksibel. Batang tarik yang terlalu panjang akan mempunyai lendutan yang besar sekali yang disebabkan oleh berat batang tarik itu sendiri. Terlebih lagi batang akan bergetar bila menahan gaya-gaya angin rangka terbuka atau bila harus menahan alat-alat yang bergetar, seperti *fans* atau *compressors*.

Untuk menanggulangi persoalan-persoalan di atas maka perlu diadakan kriteria kekakuan. Kriteria ini didasarkan atas angka kelangsingan (*slenderness ratio*) L/r dari batang, di mana L = panjang batang dan r = jari-jari kelembaman.

Maximum slenderness ratio L/r menurut:

	AISC	AASHO
■ untuk batang utama	240	200
■ untuk bracing dan batang-batang sekunder	300	240

AISC = American Institute of Steel Construction

AASHO = American Association of State Highway Officials

Menurut PPBBI:

- untuk batang utama
- untuk batang sekunder

L/r maks

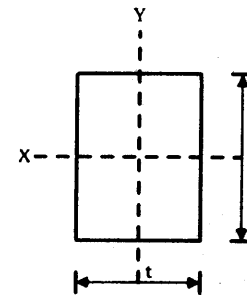
240

300

Mencari jari-jari kelembaman

$$r = \frac{I}{A}$$

Untuk batang persegi:



$$t < b$$

$$t = \text{tebal}$$

$$b = \text{lebar}$$

Dicari I terhadap sumbu lemah (sumbu y)

$$I = 1/12 b \cdot t^3$$

$$A = b \cdot t$$

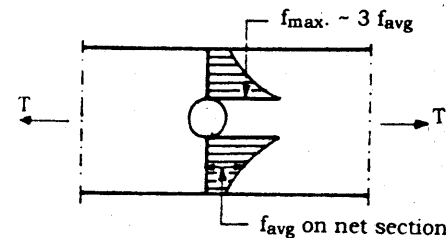
$$r = \frac{I}{A} = \frac{1/12 b t^3}{b t}$$

$$r = \frac{1}{12} t^2$$

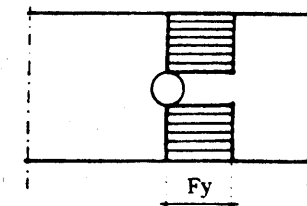
$$r = 0,288 t = r^{\min}$$

PENGARUH LUBANG

Distribusi tegangan sekitar lubang



a. Elastic Stresses



b. Ultimate Condition

Gambar 3.2

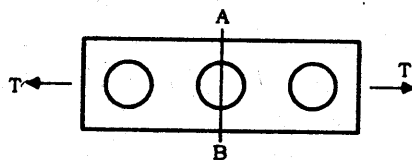
- Sesuai dengan *Charpy V-notch test*, pada sekitar lubang terjadi konsentrasi tegangan dengan distribusi tegangannya seperti pada Gambar 3.2a.
- Menurut Theory of Elasticity, tensile stress dekat lubang kira-kira 3 x tegangan rata-rata pada luas netto.
- Dengan penambahan beban pada tiap-tiap serat maka akan terjadi tegangan leleh sehingga tegangannya menjadi F_y yang sifatnya konstan, deformasinya akan bertambah (strainnya bertambah) dengan bertambahnya beban hingga semua serat telah mencapai tegangan leleh (Gambar 3.2.b). Keadaan semacam ini disebut keadaan ultimate.

PENGARUH PENEMPATAN LUBANG TERHADAP LUAS NETTO

- Menurut AISC: Luas netto efektif akibat lubang tidak boleh melampaui 85% dari luas penampang bruto.
- Menurut PPBBI: Tegangan rata-rata pada batang tarik yang berlubang tidak boleh lebih besar dari 0,75 x tegangan dasar ($75\% \alpha$) dan luas lubang $\leq 15\%$ luas penampang bruto.

Pemasangan baut atau paku keling dapat bervariasi, yaitu sebagai berikut:

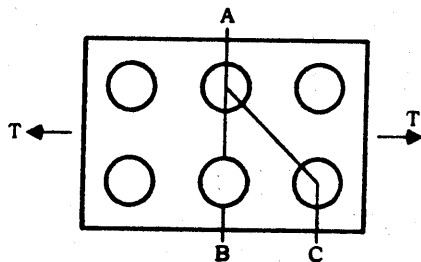
a.



Gambar 3.3a

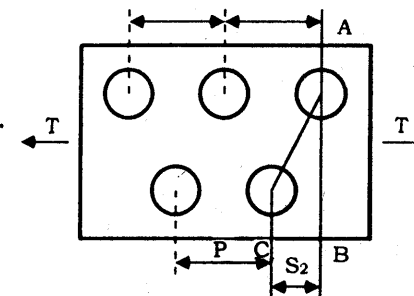
Luas netto efektif = luas penampang AB - luas lubang

b.



Gambar 3.3b

Di sini dapat dipotong menurut AB dan AC. Bidang hancur tidak mungkin sepanjang AC selama garis AC lebih panjang daripada garis yang melalui AB. Jadi luas netto kritis atau luas netto minimum ialah penampang yang melalui AB.



Gambar 3.3c

Dalam keadaan ini belum dapat ditentukan, mana potongan kritisnya, apakah garis melalui AB atau AC. Yang melalui AB hanya ada satu lubang dengan panjang AB lebih pendek daripada panjang AC, tetapi pada AC ada 2 lubang sehingga tidak dapat ditentukan mana yang lebih kecil luas netto.

Menurut PPBBI, kondisi itu dihitung sebagai berikut:

$$\text{Potongan AB : } A_n = A - n \cdot d_1 \cdot t$$

$$\text{Potongan AC : } A - n \cdot d_1 \cdot t + \sum \frac{s_z^2 \cdot t}{4 \cdot u} \quad (\text{Rumus Cochrane})$$

di mana:

A = luas penampang batang utuh

t = tebal penampang

d_1 = diameter lubang

n = banyaknya lubang dalam garis potong

s_z = jarak antara sumbu lubang pada arah sejajar sumbu batang

u = jarak antara sumbu lubang pada arah tegak lurus sumbu batang

Catatan:

Dalam suatu potongan, jumlah luas lubang tidak boleh lebih besar dari 15% luas penampang (PPBBI).

CONTOH

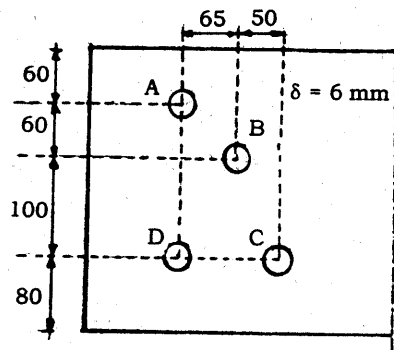
Hitunglah luas netto minimum dari gambar di bawah ini ϕ baut = $7/8" = 22$ mm, dan ukuran pelat ϕ 6 x 300

Menurut PPBBI:

$$\begin{aligned}\phi \text{ lubang} &= \phi \text{ baut} + 1 \text{ mm} \\ &= 22 + 1 = 23 \text{ mm}\end{aligned}$$

Menurut AISC:

$$\phi \text{ lubang} = \phi \text{ baut} + 1/8"$$



$$\text{Potongan AD} = [30 - 2(2,3)] \times 0,6 = 15,24 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned}\text{Potongan ABD} &= 30 - 3(2,3) + \frac{6,5^2}{4(6)} + \frac{6,5^2}{4(10)} \times 0,6 \\ &= 15,55 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Potongan ABC} &= 30 - 3(2,3) + \frac{6,5^2}{4(6)} + \frac{5^2}{4(10)} \times 0,6 \\ &= 15,29 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Luas netto yang efektif ialah potongan AD = 15,24 cm²

$$\begin{aligned}\text{Cek : } 85\% \text{ gross area} &= 0,85 \times 0,6 \times 30 = 15,3 \text{ cm}^2 \\ &(> 15,24 \text{ cm}^2) \quad (\text{OK})\end{aligned}$$

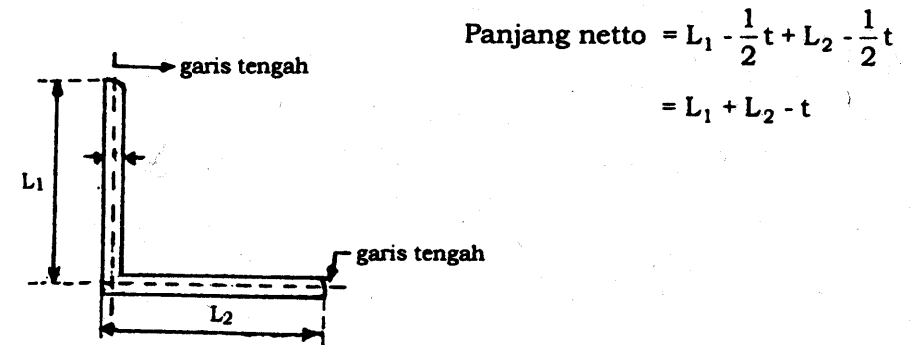
$$\text{Luas lubang} = 2,3 \times 0,6 \times 2 = 2,76 \text{ cm}^2$$

$$\text{Luas bruto} = 30 \times 0,6 = 18 \text{ cm}^2$$

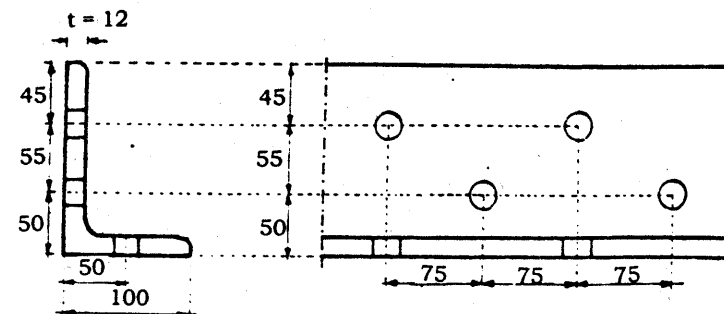
$$\begin{aligned}15\% \times 18 &= 0,15 \times 18 = 2,7 \text{ cm}^2 < 2,76 \text{ cm}^2 \\ &(\text{dianggap sama}) \quad (\text{OK})\end{aligned}$$

Catatan:

Berdasarkan AISC sudah memenuhi, tetapi berdasarkan PPBBI sebenarnya tidak memenuhi.

POTONGAN NETTO DARI BAJA DENGAN LUBANG YANG ZIG-ZAG

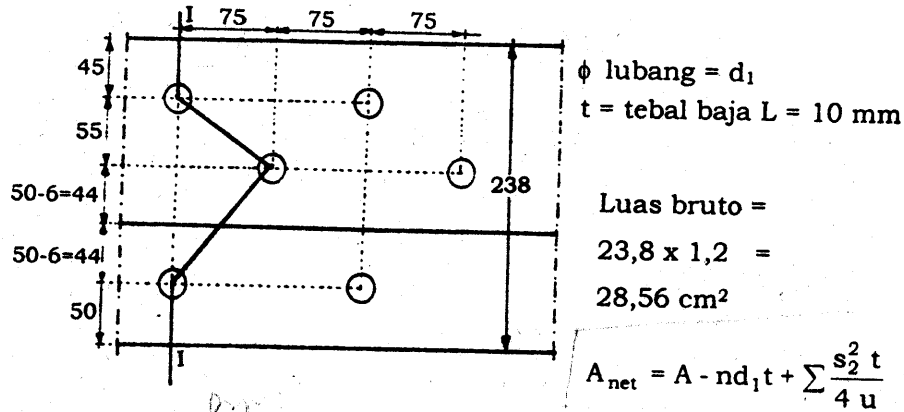
Gambar 3.4



Gambar 3.5

Panjang netto : $L = L_1 + L_2 - t = 150 + 100 - 12$
 $= 238 \text{ mm}$

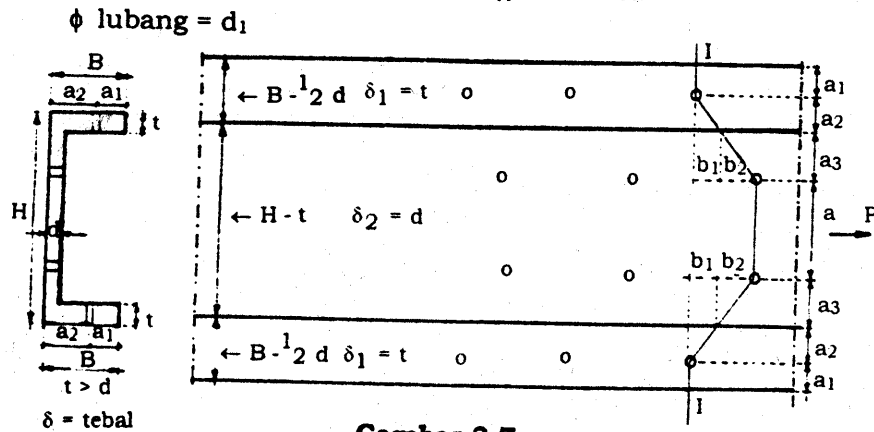
Untuk mencari luas netto efektif, dilakukan sebagai berikut:



Pot I-I: $A_{1-1} = 238 \times 1 - 3d_1 \times 1 + \frac{7,5^2 \times 1}{4 \times 5,5} + \frac{7,5^2 \times 1}{4 \times 8,5} \text{ (cm)}$

Gambar 3.6

Meninjau profil kanal dengan lubang-lubang seperti Gambar 3.7. Misalnya ditinjau potongan bidang retak I-I. Cara mencari A netto efektif pada potongan I-I adalah sebagai berikut:



Gambar 3.7

Minus $A_{net \text{ of}} = A - n d_1 t + \sum \frac{s_2^2 \cdot t}{4 \cdot u}$

$A = 2 (B - \frac{1}{2}d) t + (H - t)d$

$n d_1 t = 2 d_1 t + 2 d_1 d$

$\sum \frac{s_2^2 \cdot t}{4 \cdot u} = 2 \frac{b_1 t}{4 a_2} + 2 \frac{b_2 d}{4 a_3}$

EKSENTRISITAS SAMBUNGAN

Biasanya untuk memudahkan pekerjaan sambungan pada suatu konstruksi, batang tarik disambung secara eksentris sebagai berikut:

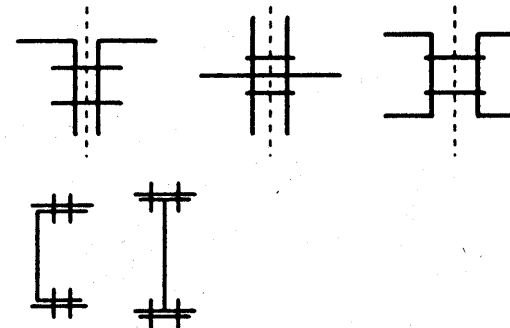
a.



b.



c.



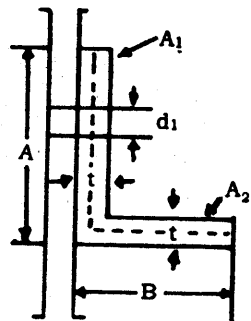
Gambar 3.8

Eksentrisitas sambungan pada ujung batang tarik ini akan menimbulkan momen lentur. Tegangan lentur yang terjadi akan memperbesar tegangan tarik yang diakibatkan oleh gaya aksial. Untuk mengatasi hal ini diadakan reduksi terhadap luas penampang batang.

Menurut peraturan Australia dan Inggris, adalah sebagai berikut:

Kasus menurut Gambar 3.8a

$$A_e = A_1 \left(1 + \frac{3 A_2}{3 A_1 + A_2} \right)$$



di mana:

A_1 = luas bersih penampang kaki yang disambung
 A_2 = luas penampang kaki yang bebas: $t(A - \frac{1}{2}t) - d_1 t$
 $= t(B - \frac{1}{2}t)$

A_e = luas efektif penampang batang

Kasus menurut Gambar 3.8b.

$$A_e = A_1 \left(1 + \frac{5 A_2}{5 A_1 + A_2} \right)$$

di mana:

A_1 = luas bersih penampang kaki | sayap \perp dan badan \parallel
 A_2 = luas penampang kaki | badan \perp dan sayap \parallel
 A_e = luas efektif penampang batang

Kasus menurut Gambar 3.8c

Pada kasus ini, di mana kedua profil saling bertolak-belakang, boleh dianggap bahwa batang menerima beban normal sentris.

$$A_e = A_{\text{bruto}} - A_{\text{lubang}}$$

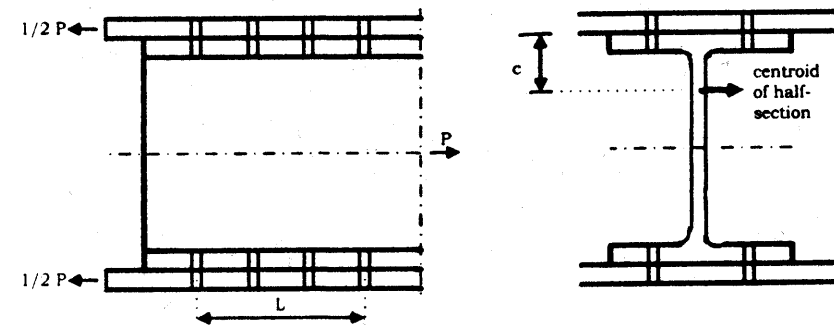
Kasus menurut Gambar 3.8d

Untuk profil dan I yang disambung pada kedua sayapnya, terdapat luas efektif penampang sebagai berikut:

$$A_e = A_n (1 - c/L)$$

di mana:

A_n = luas bersih penampang batang
 c dan L dapat dilihat pada Gambar 3.9



Gambar 3.9

c = jarak antara titik berat setengah penampang profil dengan tepi flange

L = jarak antara ujung-ujung baut/paku keling dalam arah gaya.

-ooOoo-

ALAT SAMBUNG

Pada konstruksi baja dipakai beberapa macam alat sambung, yaitu:

- a. Paku keling
- b. Baut (baut sekrup hitam)
- c. High Strength Bolt (baut mutu tinggi)
- d. Las

Bab ini hanya akan membahas paku keling dan baut. Mengenai las dan *high strength bolt* akan dibicarakan tersendiri.

Sebenarnya, di negara maju, pemakaian paku keling sudah mulai ditinggalkan dan diganti dengan high strength bolt (selanjutnya disingkat dengan HSB) atau baut mutu tinggi (BMT), sedangkan baut hanya dipakai untuk konstruksi-konstruksi yang ringan saja. Namun di Indonesia pemakaian baut dan paku keling masih dianggap penting sebagai alat sambung pada konstruksi-konstruksi yang berat (lihat di PPBBI).

Berdasarkan penemuan-penemuan baru, sambungan dengan baut biasa sebenarnya tidak dapat dianggap *rigid* (kaku). Sambungan dapat dikatakan rigid apabila sambungan tersebut menggunakan alat sambung HSB dan las.

Paku keling sebenarnya dapat membuat sambungan menjadi cukup kaku karena mempunyai *shear resistance*, tetapi shear resistance pada paku keling ini timbul karena adanya proses pendinginan pada pemasangan. Sayangnya berapa besarnya shear

resistance yang terjadi tidak dapat diatur. Masing-masing paku keling mempunyai shear resistance yang berbeda. Oleh karena itu sukar untuk memasukkan shear resistance ini ke dalam perhitungan.

PAKU KELING (RIVET)

Bentuk baku paku keling dapat dilihat pada Gambar 4.1 Cara pemasangannya adalah sebagai berikut:

- bahan baku dipanaskan hingga memijar
- dimasukkan dalam lubang
- ditekan sehingga terbentuk bagian kepala dari paku keling



Gambar 4.1

- selama proses penekanan ini paku keling akan memenuhi ruang lubang sehingga m paku menjadi $= m$ lubang
 - dibiarkan dingin
- Selama pendinginan ini terjadi pengerutan pada paku keling sehingga terjadi *clamping force* sehingga paku keling mempunyai shear resistance. Besar *clamping force* yang terjadi untuk masing-masing paku keling tidak sama sehingga sulit untuk dapat dimasukkan ke dalam perhitungan.

Selain itu ada juga pemasangan paku keling yang dilakukan dalam keadaan dingin (tanpa pemanasan). Paku keling yang dipasang dalam keadaan dingin tidak mempunyai *clamping force*.

JARAK PEMASANGAN PAKU KELING

Jarak-jarak pemasangan yang ada di PPBBI ialah untuk baut dan yang untuk paku keling tidak disebutkan. Pada prinsipnya pemasangan baut lebih membutuhkan tempat berhubung dengan

alat pemasangnya. Oleh karena itu jarak untuk pemasangan paku keling disamakan dengan jarak pemasangan baut.

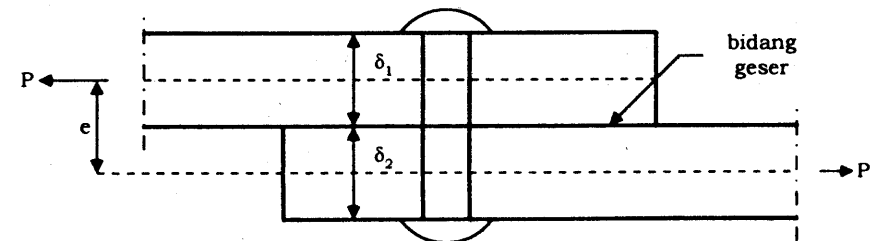
Pemasangan paku keling/baut dengan jarak yang lebih besar dapat menyebabkan bagian yang dikeling/dibaut menjadi cembung sehingga sambungan jadi mudah berkarat. Alat sambung yang dipasang hanya sebagai pelengkap saja dapat agak longgar, asal bagian sambungan sudah dilapisi dengan bahan tahan karat (misalnya meni dan sebagainya). Zat-zat yang dapat menjadi penyebab karat antara lain: udara lembab, air, embun, uap asam dan sebagainya.

Cara pemasangan paku keling/baut dapat dilihat di PPBBI '83 Bab 8 ayat 8.2 butir (3), (4), (5), (6). Tegangan yang diijinkan dalam menghitung kekuatan paku keling dapat dilihat dalam PPBBI '83 Bab 8 ayat 8.3.

PERHITUNGAN SAMBUNGAN DENGAN PAKU KELING

Ada 2 macam sambungan, yaitu sambungan beririsan satu dan sambungan beririsan kembar.

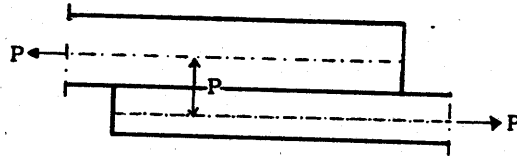
a. Sambungan Beririsan Satu



Gambar 4.2

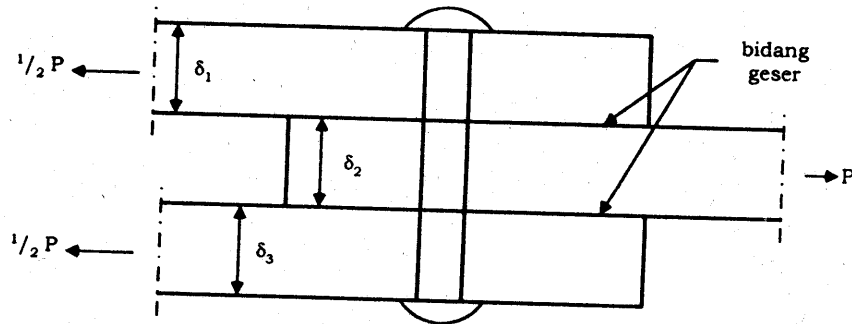
- Sambungan irisan satu mempunyai satu bidang geser.
- Biasanya $\delta_1 = \delta_2$
- Bila $\delta_1 \neq \delta_2$, maka diambil δ yang terkecil.
- Tampak adanya momen sekunder karena adanya eksentrisitas sebesar e .

- Akibat momen sekunder = p.e batang akan membengkok. Dengan adanya bengkokan ini konstruksi menjadi kurang baik. Oleh karena itu sambungan irisan satu sedapat mungkin harus dihindari.



Gambar 4.3

b. Sambungan Beririsan Kembar



Gambar 4.4

- Sambungan irisan kembar mempunyai 2 bidang geser.
- Biasanya $\delta_2 < 2\delta_1$. Diambil harga yang terkecil.
- Pada sambungan irisan kembar tidak terjadi momen sekunder.
- Sambungan ini merupakan sambungan konstruksi yang baik.

KERUSAKAN SAMBUNGAN

Rusaknya sambungan disebabkan oleh:

- Pembebanan terlalu besar pada geseran di bidang geser sehingga paku menjadi patah akibat geseran.

- Tekanan terlalu besar pada dinding lubang atau disebut tekanan tumpu, sehingga dinding lubang rusak karena adanya tekanan tumpu (tekanan dinding lubang).

KEMAMPUAN SAMBUNGAN

Kemampuan alat penyambung didasarkan atas:

- keruntuhan geser
- keruntuhan tumpu

a. Terhadap geser (τ)

Untuk yang beririsan tunggal:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi d^2$$

Untuk yang beririsan kembar:

$$\bar{P} = 2 \times \frac{1}{4} \pi d^2$$

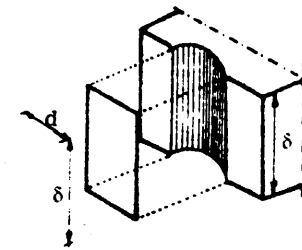
$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi d^2$$

$d = \phi$ paku keling = ϕ lubang dalam cm
 = tegangan geser ijin dalam kg/cm^2
 = 0,8 (PPBBI '83)

\bar{P} = beban yang diijinkan yang dipikul oleh paku keling

b. Terhadap tumpu (σ_{tu})

Luas lubang yang tertekan sebenarnya bidang cekung + silinder (Gambar 4.5). Tetapi untuk mudahnya diambil proyeksi sebesar $\delta \times d$ Maka beban tumpu yang dapat dipikul oleh bidang tumpu = (dinding lubang dari pelat):



Gambar 4.5

$$\bar{P} = \delta d \sigma_{tu}$$

σ = tebal pelat yang disambung dalam cm

d = ϕ paku keling dalam cm

\bar{P} = beban yang diijinkan yang dipikul oleh dinding lubang pelat

$$\sigma_{tu} = 2 \sigma \text{ untuk } s_1 \geq 2 d$$

$$\sigma_{tu} = 1,6 \sigma \text{ untuk } 1,5 d \leq s_1 < 2 d$$

S_1 adalah jarak paku keling terakhir terhadap ujung batang

Lihat PPBBI 83 Bab 8 ayat 8.3 dengan catatan:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \text{ seharusnya } \sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 1,56\tau^2}$$

MENENTUKAN KEKUATAN DUKUNG PAKU KELING

a. Untuk sambungan irisan tunggal

$$\left. \begin{array}{l} \bar{P} = \frac{1}{4} \pi d^2 \\ \bar{P} = \delta d \sigma_{tu} \end{array} \right\} \text{diambil harga yang terkecil}$$

b. Untuk sambungan irisan kembar

$$\left. \begin{array}{l} \bar{P} = \frac{1}{2} \pi d^2 \\ \bar{P} = \delta d \sigma_{tu} \end{array} \right\} \text{diambil harga yang terkecil}$$

c. Bila pada penampang paku keling bekerja gaya geser dan gaya aksial bersama-sama, maka terjadi:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 1,56\tau^2} \leq \sigma$$

σ_i = tegangan ideal

DAYA GUNA TERBESAR DARI PAKU KELING

Suatu paku keling akan mendapat daya guna yang terbesar, bila daya muat pada tekanan tumpu = daya muat pada geseran, sehingga:

a. Untuk paku beririsan tunggal (satu)

$$\frac{1}{4} \pi d^2 = \delta d \bar{\sigma}_{tu}$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{\sigma}_{tu} = 2 \sigma_t \\ \bar{\tau} = 2 \sigma_t \end{array} \right\} \bar{\sigma}_{tu} = 2,5$$

$$\frac{1}{4} \pi d^2 = \delta d \times 2,5$$

$$d \approx 3,2 \delta$$

b. Untuk paku keling yang beririsan kembar

$$\frac{1}{2} \pi d^2 = \delta d \bar{\sigma}_{tu}$$

$$\frac{1}{2} \pi d^2 = \delta d \times 2,5$$

$$d \approx 1,6 \delta$$

Jadi untuk paku keling yang beririsan tunggal dengan $d \approx 3,2 \delta$ dan untuk paku keling beririsan kembar dengan $d \approx 1,6 \delta$, daya muatnya pada geseran = daya muatnya pada tekanan tumpu.

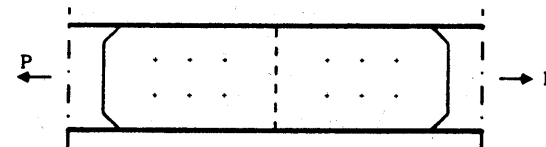
Jadi bila dipakai ϕ paku keling $\approx 3,2 \delta$ untuk irisan tunggal dan ϕ paku keling $\approx 1,6 \delta$ untuk irisan kembar, kita cukup memakai satu rumus saja, yaitu P , atas dasar tekanan geser saja atau atas dasar tekanan tumpu saja.

PENGGUNAAN PAKU KELING

Untuk peraturan-peraturan/persyaratan-persyaratan penggunaan paku keling atau baut, lihat PPBBI '83 Bab 8 ayat 8.1, 8.2 dan 8.3. Dalam PPBBI '83 disebutkan: banyaknya baut/paku keling yang dipasang pada satu baris yang sejajar gaya, tidak boleh lebih dari 5 buah. Kalau dalam satu baris terdapat lebih dari 5 paku keling, buatlah dalam 2 baris atau dengan pertolongan penghubung. Misalnya:

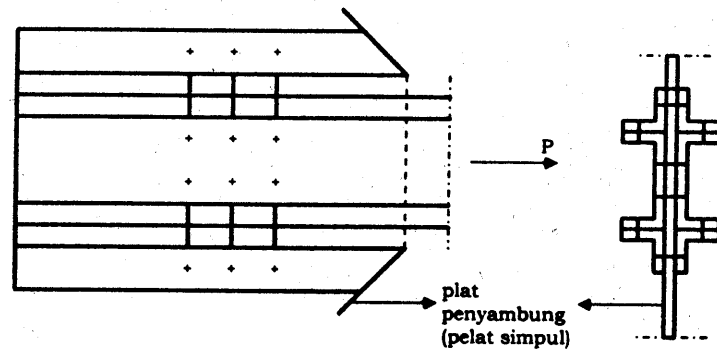
a. Dipakai 6 paku > 5 paku

Dibuat 2 baris sebagai berikut:



Gambar 4.6

- b. Dipakai 12 paku > 5 paku
Dipakai pertolongan penghubung sebagai berikut:



Gambar 4.7

BAUT SEKRUP

Baut sekrup lebih mahal daripada paku keling. Yang baik adalah baut sekrup hitam.

Keuntungan pemakaian baut ialah:

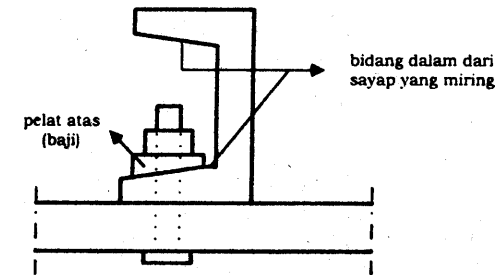
1. Mudah pemasangannya sehingga ongkos pemasangannya lebih murah bila dibandingkan dengan ongkos pemasangan paku keling. Pada pemasangan paku keling dibutuhkan tenaga yang memang ahli dalam pemasangan paku keling. Diperlukan tenaga ahli yang cukup banyak, karena pemasangan paku keling memakan waktu yang jauh lebih lama daripada pemasangan baut.
2. Mudah diganti dan mudah dilepas sehingga dapat dipindahkan.

Kekurangan dari pemakaian baut ialah:

- Tidak baik untuk dipakai pada konstruksi yang mengalami beban berulang. Oleh karena itulah pada jembatan dipakai paku keling.

Dalam praktek umumnya dipakai baut sekrup pada pekerjaan bangunan gedung, walaupun sebenarnya sambungan dengan baut ini tidak dapat dianggap rigid berdasarkan teori-teori baru. Kenyataan dalam praktek sampai saat ini di Indonesia masih selalu menggunakan sambungan dengan baut pada pekerjaan bangunan gedung.

Pemasangan baut pada sayap dari suatu profil, di mana umumnya bidang sebelah dalam dari sayap terdapat miring, perlu dipakai pertolongan pelat alas yang berbentuk baji supaya mendapat bidang yang rata pada mur seperti terlihat Gambar 4.8.



Gambar 4.8

Cara perhitungan mencari daya dukung baut, sama dengan pada paku keling. Perbedaannya hanya terletak pada tegangan ijinnya.

MENENTUKAN KEKUATAN DUKUNG DARI BAUT

- a. Untuk sambungan irisan satu

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{4} d^e \tau \\ \bar{P} &= \delta d \sigma_{tu} \end{aligned} \right\} \text{diambil harga yang terkecil}$$

δ diambil yang terkecil dari δ_1 dan δ_2

$$\tau = 0,6 \sigma$$

$$\sigma_{tu} = 1,5 \sigma \text{ untuk } s_1 \geq 2 d$$

$$\sigma_{tu} = 1,2 \sigma \text{ untuk } 1,5 d \leq s_1 < 2 d$$

s_1 adalah jarak paku keling yang terakhir terhadap ujung batang.

- b. Untuk sambungan irisan kembar

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{2} d^2 \tau \\ \bar{P} &= \delta d \sigma_{tu} \end{aligned} \right\} \text{diambil harga yang terkecil}$$

δ diambil yang terkecil dari δ_1 dan δ_2

$$\tau = 0,6 \sigma$$

$$\sigma_{tu} = 1,5 \sigma \text{ untuk } s_1 \geq 2 d$$

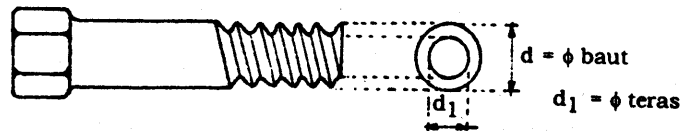
$$\sigma_{tu} = 1,2 \sigma \text{ untuk } 1,5 d \leq s_1 < 2 d$$

c. Bila pada penampang baut bekerja gaya geser dan gaya aksial bersama-sama, maka terjadi:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

σ_i = tegangan ideal

Selain itu harus diperhatikan bahwa ada ulir pada baut. Pada daerah yang berulir ada 2 macam diameter, yaitu diameter teras dari ulir dan diameter baut.



Gambar 4.9

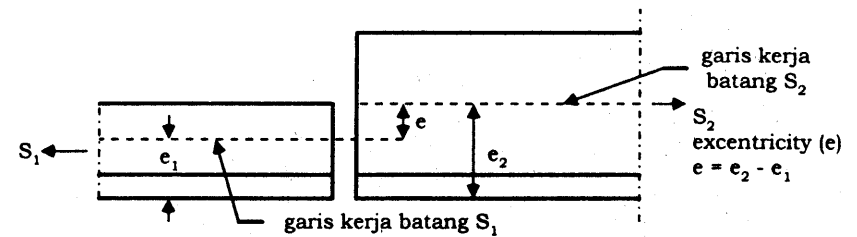
- Apabila baut mengalami tarikan maka besarnya tegangan tariknya berdasarkan ϕ terkecil. Jadi berdasarkan ϕ teras.
- Apabila bagian yang berulir jatuh pada bidang geser sambungan maka besarnya tegangan tarik dan gesernya berdasarkan ϕ teras.

Diameter lubang baut berdasarkan PPBBI'83 harus 1 mm lebih besar daripada ϕ bautnya sendiri.

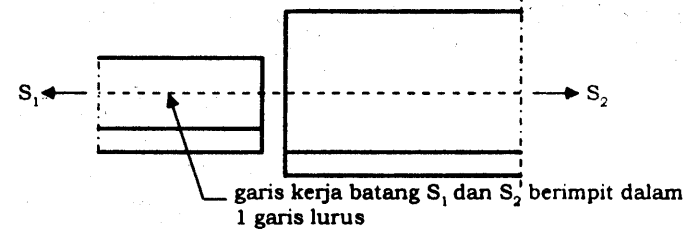
MENYAMBUNG DUA BATANG YANG TIDAK SAMA UKURAN PENAMPANGNYA

Hal ini biasanya terjadi pada sambungan titik simpul dari batang-batang tepi suatu rangka batang. Untuk menghindari adanya eksentrisitas dari garis kerja batang yang berbeda (untuk menghindari adanya momen sekunder), caranya adalah dengan meletakkan kedua batang tersebut sedemikian rupa sehingga garis kerja gayanya berada dalam satu garis lurus.

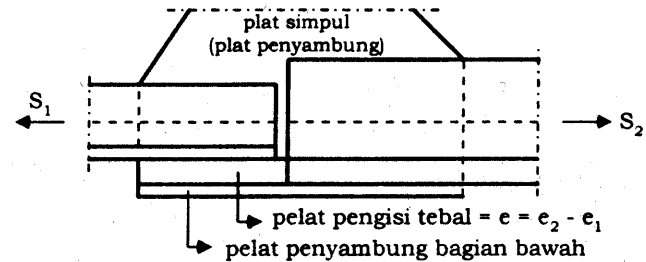
a.



b.



c.



Gambar 4.10

Gambar 4.10a

Pada Gambar 4.10.a, dengan membuat pinggir bawah dari batang-batang S_1 dan S_2 berada dalam satu garis lurus karena batang $S_1 \neq S_2$ maka akan terjadi eksentrisitas sebesar $e = e_2 - e_1$. Dengan adanya eksentrisitas ini akan timbul momen tambahan sebesar $S_2 \cdot e$

Gambar 4.10b

Dengan meletakkan kedua batang S_1 dan S_2 seperti Gambar 4.10b, eksentrisitas (e) akan hilang.

Gambar 4.10c

Pada sambungan titik simpul, biasanya untuk meringankan beban pada pelat simpul, dibantu oleh pemasangan pelat penyambung di bawah. Karena itu, untuk dapat memasang pelat penyambung bagian bawah, di bawah batang S_1 diberi pelat pengisi (bagian yang diarsir) setebal $e = e_2 - e_1$.

PEMBAGIAN KERJA GAYA-GAYANYA

Misalnya dipakai baja L sama kaki.

$\frac{1}{2}$ bagian S_1 dipikul oleh pelat simpul.

$\frac{1}{2}$ bagian S_1 dipikul oleh pelat penyambung bawah. Dengan demikian pelat penyambung bawah menerima beban $\frac{1}{2} S_1$ ke kiri (\leftarrow).

Kalau pelat penyambung bawah dihubungkan dengan batang S_2 bagian bawah, maka gaya batang S_2 yang dipikul oleh pelat simpul menjadi berkurang sebesar $S_2 - \frac{1}{2} S_1$. (Dengan demikian beban pelat simpul menjadi lebih ringan).

Catatan: bila baja tidak sama kaki maka pembagian kerjanya disesuaikan dengan perbandingan luas kaki tegak dengan luas kaki mendatar baja tersebut.

SAMBUNGAN YANG MEMAKAI PELAT PENGISI

Sambungan antara kaki mendatar batang S_1 dengan pelat penyambung bawah diberi pelat pengisi. Bila tebal pelat pengisi ≥ 6 mm, maka jumlah paku keling/baut harus ditambah sesuai kebutuhan.

Penambahan paku keling/baut harus dihitung berdasarkan rumus:

$$n \geq \frac{N}{N} \frac{A_p}{A + A_p}$$

di mana:

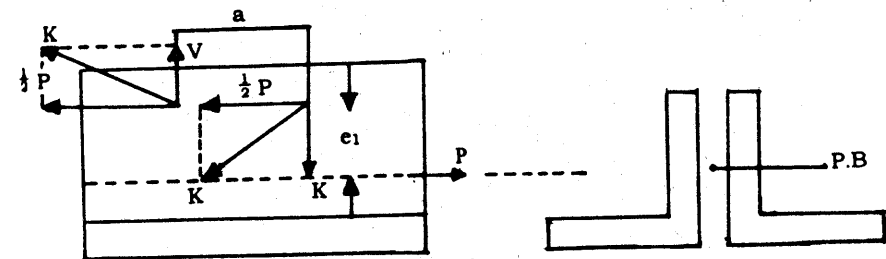
n = jumlah penambahan baut atau paku keling

N = gaya yang bekerja pada sambungan

- N = gaya ijin (gaya dukung) pada sebuah paku keling/baut
 A_p = luas penampang pelat pengisi
 Bila pelat pengisi ada pada kedua sisi pelat yang disambung, maka:
 A_p = luas pelat pengisi yang paling tebal.
 A = Luas pelat yang disambung

(Lihat PPBBI '83 Bab 8, ayat 8.1, butir 7)

Adanya eksentrisitas akibat penempatan pk/bt tidak pada garis kerja gaya.



Gaya P dipindahkan ketempat pk/bt dipasang, maka diperlukan momen sebesar $M = Pe_1$ (e_1 jarak antara garis kerja gaya dengan penempatan paku keling).

- Akibat gaya tarik geser P , pada masing-masing pk/bt terjadi gaya reaksi sebesar $\frac{1}{2} P$.
- Akibat momen $= Pe_1$ pada masing-masing pk/bt terjadi gaya reaksi arah vertikal V , dimana $M = Pe_1 = Va$ (a = jarak antara kedua pk/bt)

$$Pe_1 = Va \rightarrow V = \frac{Pe_1}{a}$$

- Maka masing-masing pk/bt menerima gaya geser sebagai resultante dari $\frac{1}{2} P$ dan V yaitu:

$$K = \sqrt{\left(\frac{1}{2} P\right)^2 + (V)^2}$$

Besarnya gaya K ini $\approx 20\%$ lebih besar dari $\frac{1}{2}P$. Jadi dalam perhitungan banyaknya pk/bt yang diperlukan dilakukan sebagai berikut:

- Hitung dulu gaya geser P saja, diperlukan n bt/pk
- Kemudian dengan memperhitungkan pengaruh $M = Pe_1$ diperoleh banyaknya pk/bt: $n^1 = \phi \times n$ dimana ϕ adalah sama dengan $K = 1,20$

Selanjutnya besarnya ϕ ini dapat dibaca pada tabel sebagai berikut:

Daftar I (untuk satu deret pk/bt)

Jumlah pk/bt	2	3	4	5
ϕ	1,20	1,11	1,07	1,05

Daftar II (untuk dua deret pk/bt)

Jumlah pk/bt	2 + 2	3 + 3	4 + 4	5 + 5
ϕ	1,6	1,4	1,25	1,20

Catatan:

1. Bila dipakai (2 + 3) maka $\phi = 1,6$
Bila dipakai (3 + 4) maka $\phi = 1,4$
Bila dipakai (4 + 5) maka $\phi = 1,25$
2. Dalam tabel dapat dilihat, bahwa makin banyak jumlah pk/bt makin kecil ϕ -nya (Hal ini disebabkan karena jika jarak a makin besar, besarnya V makin kecil sehingga harga ϕ makin kecil)
3. Memperbesar banyaknya pk/bt dengan cara ini hanya berlaku bila beban yang dipikul merupakan beban berulang, misalnya beban gempa, mesin dan sebagainya.
4. Apabila beban yang dipikul adalah beban statis, pengaruh momen sekundair $M = Pe$, dapat diabaikan (Lihat PPBBI 83 Bab & ayat 8, 1 butir 4)

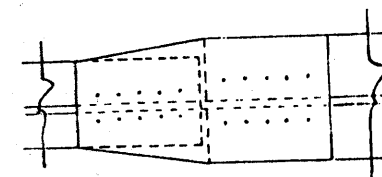
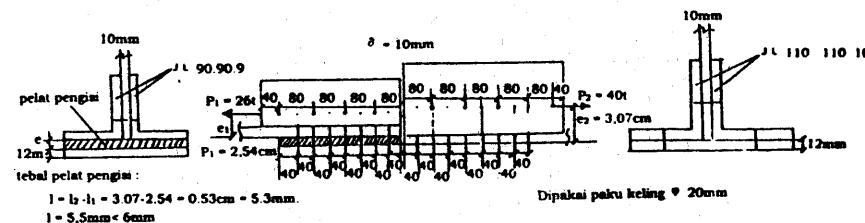
Contoh soal:

Suatu baja siku setangkup $\text{JL } 90.90.9$ disambung pada pelat simpul dengan baja siku setangkup $\text{JL } 110.110.10$. Pada titik simpul $\text{JL } 90.90.9$ memikul gaya tarik 2 bt sedangkan baja siku $\text{JL } 110.110.10$ memikul gaya tarik 40 t. Dipakai mutu baja Bj 37. Dipakai paku keling 620 mm. Lihat selanjutnya gambar dibawah ini.

Ditanyakan:

- a. Selidikilah apakah batang $\text{JL } 90.90.9$ dan batang $\text{JL } 110.110.10$ cukup kuat
- b. Selidikilah apakah paku keling yang dipasang cukup kuat
- c. Selidikilah apakah pelat penyambung bawah cukup kuat

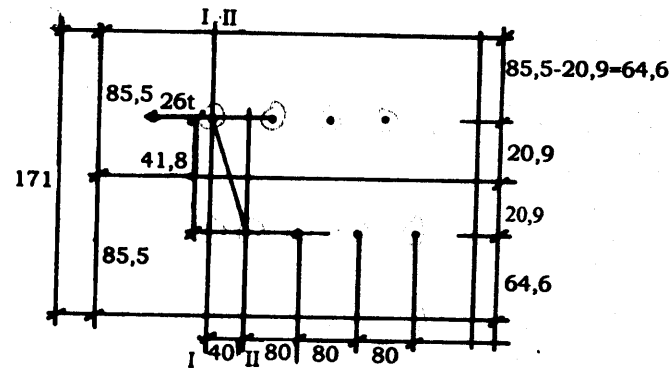
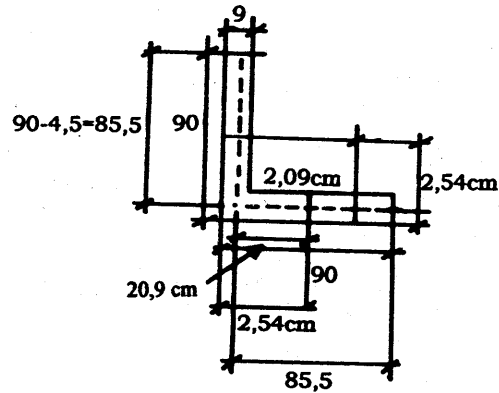
Jawab:



TAMPAK BAWAH

a) Menyelidiki kekuatan batang $\llcorner 90.90.9$

Ditinjau setengah bagian sebagai berikut:



$$\text{Potongan I-I: } A_n = 171 \times 9 - 1 \times 20 \times 9 = 1539 - 180 = 1359 \text{ mm}^2 = 13,59 \text{ cm}^2$$

$$\text{Potongan II-II: } A_n = 1539 - 2 \times 20 \times 9 + \frac{40^2 \times 9}{4 \times 41,8} = 1539 - 360 + 86,12 = 1265 \text{ mm}^2 = 12,65 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{neto efektif}} = 12,65 \text{ cm}^2$$

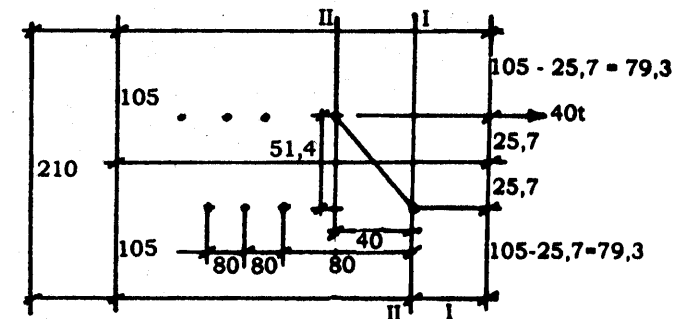
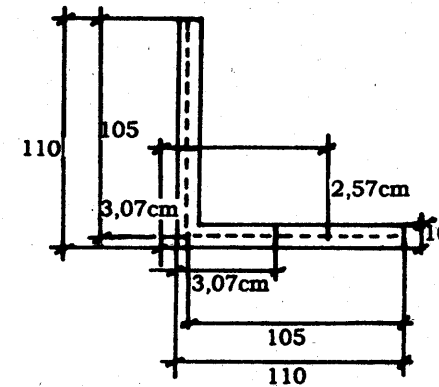
$$0,85 A_{\text{gross}} = 0,85 \times 1539 = 1308 \text{ mm}^2 = 13,08 \text{ cm}^2 > 12,65 \text{ cm}^2 \text{ (OK)}$$

$$\bar{N} = \bar{\sigma}_{\text{tr}} \times A_{\text{n.ef.}} = 1600 \times 0,75 \times 12,65 \text{ cm}^2 = 151,80 \text{ kg}$$

$$\text{Untuk baja } \llcorner \text{ setangkup } \llcorner 90.90.9, \bar{N} = 2 \times 151,80 = 30360 \text{ kg} = 30,36 \text{ ton} < P_1 = 26 + \text{(OK)}$$

Menyelidiki kekuatan batang $\llcorner 110.110.10$

Seperti diatas ditinjau $1/2$ bagian.



Pot I-I : $A_n = 210 \times 10 - 20 \times 10 = 2100 - 200 = 1900 \text{ mm}^2 = 19 \text{ cm}^2$

Pot II-II: $A_n = 2100 - 2 \times 20 \times 10 + \frac{40^2 \times 10}{4 \times 51,4} = 2100 - 400 + 77,82 = 1777,8 \text{ mm}^2 = 17,78 \text{ cm}^2$

$A_{n.ef} = 17,78 \text{ cm}^2$

$\bar{N} = \bar{\sigma}_{tr} \times A_{n.ef} = 1600 \times 0,75 \times 17,78 = 21336 \text{ kg} = 21,336 \text{ t}$

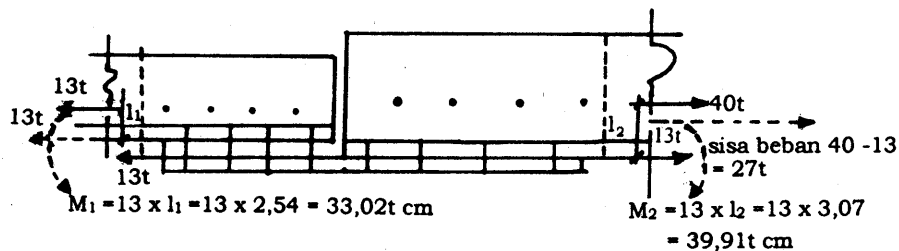
Untuk baja [setangkup] 110.110.10, $\bar{N} = 2 \times 21,336 \text{ t} = 42,672 \text{ t} > 40 \text{ t}$ (OK)

Cek syarat An.ef

$\llcorner 90.90.9 : 0,85 \times 15,39 = 13,08 \text{ cm}^2$
 $A_{n.ef} = 12,65 \text{ cm}^2$ } $A_{n.ef} > 85\% A_{bruto}$ (OK)

$\llcorner 110.110.10 : 0,85 \times 2100 = 1785 \text{ mm}^2 = 17,85 \text{ cm}^2$
 $A_{n.ef} = 17,78 \text{ cm}^2$ } $A_{n.ef} < 85\% A_{bruto}$ (OK)

b) Menyelidiki paku keling $\phi 20 \text{ mm}$ pada batang $\llcorner 90.90.9$



$l = l_2 - l_1 = 3,07 - 2,54 = 0,53 \text{ cm} = 5,3 \text{ mm} < 6 \text{ mm}$ (Berarti banyak paku keling tidak perlu ditambah dengan n)

Besarnya gaya dukung paku keling dihitung sebagai berikut:

Untuk sambungan bagian kaki tegak adalah sambungan irisan kembar

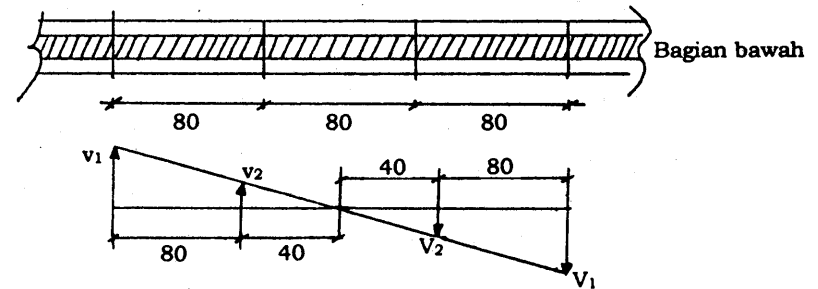
$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi d^2 \bar{\tau} = \frac{1}{2} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 8046 \text{ kg}$
 $\bar{P} = \delta d \bar{\tau} = 1 \times 2 \times 2 \times 1600 = 6400 \text{ kg}$ } dipakai $\bar{P} = 6400 \text{ kg}$

Ada 4 paku keling, maka gaya yang dapat dipikul ialah $4 \times 6400 = 25600 \text{ kg} = 25,6 \text{ t} > 13 \text{ t}$ (OK)

Pada kaki mendatar ada 8 paku keling yang selain memikul gaya geser akibat gaya geser 13 t juga memikul momen akibat perpindahan $\frac{1}{2}$ bagian dari gaya total 26 t kekampuh sambungan yang disertai momen sebesar $M_1 = 33,02 \text{ t cm}$.

Akibat momen 33,02 t cm timbul gaya aksial pada paku keling. Jadi paku keling selain memikul gaya geser juga memikul gaya aksial, maka terjadi $\tau_1 = \sqrt{\sigma^2 + 1,5 \tau^2} \leq \bar{\sigma}$

Gaya aksial pada paku keling adalah sebagai berikut:



$V_2 = \frac{40}{120} \times V_1 = \frac{1}{3} V_1$

$M = V_1 \times 240 + \frac{1}{3} V_1 \times 80 = 24 V_1 + 2,67 V_1 = 26,67 V_1 = t \text{ cm}$

$M_1 = 33020 \text{ t cm}$

$26,67 V_1 = 33020 \rightarrow V_1 = \frac{33020}{26,67} = 1238 \text{ kg}$

Paku keling yang paling tepi yang memikul gaya aksial yang paling besar (yang paling berbahaya).

Kedelapan paku keling menerima beban geser 13 t, sehingga tiap paku keling memikul beban geser sebesar $\frac{13000}{8} = 1625$ kg.

Pada paku keling yang paling berbahaya terjadi tegangan ideal sebagai berikut:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 1,56 \tau^2} \leq \bar{\tau}$$

$$\sigma = \frac{1238}{\frac{1}{4} \pi d^2} = \frac{1238}{3,143} = 394 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau = \frac{1625}{\frac{1}{4} \pi d^2} = \frac{1625}{3,143} = 517 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_i = \sqrt{394^2 + 1,56 \times 517^2} = 756 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Jadi 4 paku keling ϕ 20 pada kaki tegak dan 8 paku keling ϕ 20 pada kaki mendatar pada batang \llcorner 90.90.9 adalah cukup kuat.

Menyelidiki kekuatan paku keling ϕ 20 mm pada batang \llcorner 110.110.10

Pada kaki vertikal gaya yang dipikul tinggal $40 - 13 = 27$ t, karena beban sebesar 13 t hanya dipindahkan ke kampuh sambungan kaki horisontal dan terjadi pula momen sebesar 39,91 t cm. Sambungan pada kaki vertikal adalah sambungan irisan kembar

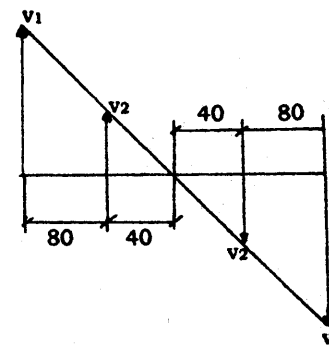
$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{2} \pi 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 8046 \text{ kg} \\ \bar{P} &= 1 \times 2 \times 2 \times 1600 = 6400 \text{ kg} \end{aligned} \right\} \text{ dipakai } \bar{P} = 6400 \text{ kg}$$

Ada 5 paku keling maka gaya yang dipikul oleh ke 5 pada keling sebesar:

$$5 \times 6400 = 3200 \text{ kg} > 27000 \text{ kg (27 t) (OK)}$$

Sambungan pada kaki mendatar adalah sambungan irisan tunggal sebanyak 8 paku keling gaya geser yang dipikul oleh 8 paku keling ini sebesar 13 t 1 paku keling memikul gaya geser

sebesar $\frac{13000}{8} = 1625$ kg gaya aksial yang diterima oleh paku keling adalah sebagai berikut:



Sudah dihitung didepan

$$M = 26,67 V_1$$

$$M_2 = 39910 \text{ kg cm}$$

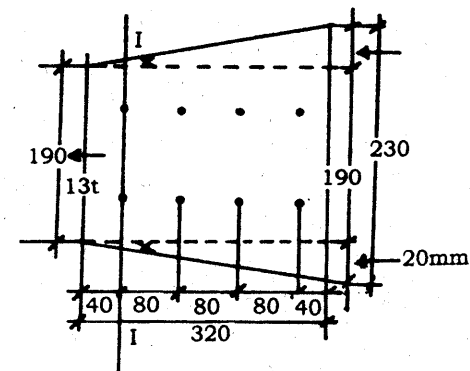
$$M = M_2 \rightarrow 26,67 V_1 = 39910 \rightarrow V_1$$

$$= \frac{39910}{26,67} = 1496 \text{ kg}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1496}{\frac{1}{2} \pi d^2} = \frac{1496}{3,143} = 476 \text{ kg/cm}^2 \\ \tau &= \frac{1625}{\frac{1}{2} \pi d^2} = \frac{1625}{3,143} = 517 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned} \right\} \sigma_i = \sqrt{476^2 + 1,56 \times 517^2}$$

$$= 802 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

c). Menyelidiki kekuatan pelat penyambung bawah



Ditinjau A_n pada Pot I-I $\frac{230-190}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ mm}$

$$\frac{x}{20} = \frac{40}{320} \rightarrow \frac{x}{2} = \frac{4}{8} \rightarrow x = 1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm}$$

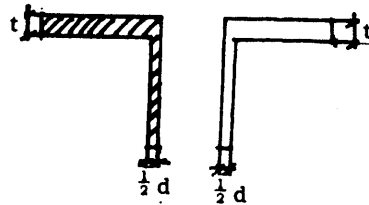
$$\begin{aligned} \text{An.ef pot I-I: } & (19 + 2 \times 0,1) \times 1,2 - 2 \times 2 \times 1,2 \\ & = 19,2 \times 1,2 - 2 \times 2 \times 1,2 \\ & = 23,04 - 4,8 = 18,24 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Beban yang dipikul = 13 t = 13000 kg.

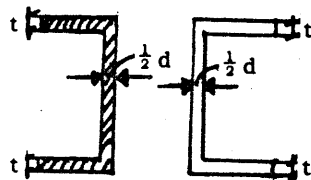
$$\sigma_{tr} = \frac{13000}{18,24} = 713 \text{ kg/cm}^2 < 0,75 \times 1600 = 1200 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Mencari A_n ef profil T dan profil I atau H

Untuk mencari A_n ef profil T indentik dengan cara mencari A_n ef profil siku yang ditangkup. Hanya saja disini tebal kaki tegak dan kaki mendatarnya tidak sama.



Untuk mencari A_n ef profil I atau H indentik dengan cara mencari profil kanal [yang tertangkup].



-ooOoo-

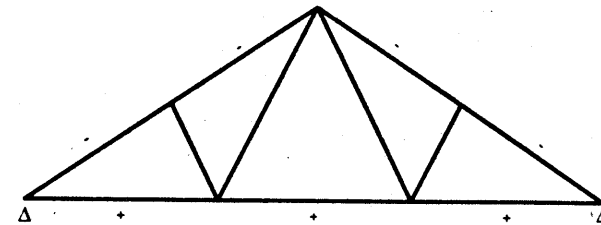
BAB

V

BATANG TEKAN

Ada 2 macam batang tekan:

- Batang tekan yang merupakan batang dari suatu rangka batang. Batang ini dibebani gaya tekan aksial searah panjang batangnya. Umumnya dalam suatu rangka batang, batang-batang tepi atas merupakan batang tekan, misalnya pada rangka batang atap seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 5.1

- Kolom: merupakan batang tekan tegak yang bekerja untuk menahan balok-balok loteng, rangka atap, lintasan crane dalam bangunan pabrik dan sebagainya yang untuk seterusnya akan melimpahkan semua beban tersebut ke pondasi.

SIFAT DARI BATANG TEKAN

Keruntuhan batang tekan dapat dikategorikan menjadi 2, yaitu:

1. Keruntuhan yang diakibatkan tegangan lelehnya dilampaui. Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang pendek (*stocky column*).
2. Keruntuhan yang diakibatkan oleh terjadinya tekuk. Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang langsing (*slender column*).

Pada keruntuhan akibat tekuk ini, asalkan tegangan pada seluruh penampang masih dalam keadaan elastis (belum mencapai σ_1), gaya tekuknya dapat dihitung berdasarkan rumus Euler:

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}$$

Apabila sebagian penampang tegangannya menjadi σ_1 , gaya tekuk batang inelastis ini ditentukan dengan interpolasi linear dari pola keruntuhan yang diakibatkan oleh dilampauinya tegangan leleh dan pola keruntuhan yang diakibatkan oleh terjadinya tekuk.

Keberadaan tegangan residu dalam profil sangat mempengaruhi kekuatan tekuknya. Pengaruh ini diperhitungkan dengan mengambil tegangan residu maksimum rata-rata sebesar 0,3 dari tegangan lelehnya.

TEGANGAN RESIDU

Tegangan residu (*residual stresses*) adalah tegangan yang tertinggal tetap dalam profil setelah selesai profil dibentuk, meskipun belum ada beban luar yang bekerja padanya.

Menurut hasil penelitian/penyelidikan, tegangan residu ini timbul oleh karena adanya deformasi plastis yang diakibatkan oleh:

- a. Pendinginan setelah proses *hot-rolling*.
- b. *Cold bending* atau *cambering* selama fabrikasi.
- c. Pengelasan.

KELANGSINGAN BATANG TEKAN (λ)

Kelangsingan batang tekan ini tergantung dari jari-jari kelembaban (i) dan panjang tekuk (L_k).

i: Karena batang mempunyai 2 jari-jari kelembaban, umumnya akan terdapat 2 harga λ .

Yang menentukan ialah harga λ yang terbesar. (atau dengan i yang terkecil)

L_k : Panjang tekuk ini juga tergantung pada keadaan ujung-ujungnya, apakah sendi, jepit, bebas, dan sebagainya. Panjang tekuk ini dapat dicari dengan menggunakan Tabel 6 atau nomogram 1.

λ_{batas} (= ANGKA KELANGSINGAN)

λ_{batas} adalah batas angka kelangsingan di mana Euler tidak lagi berlaku (berarti memasuki daerah plastis). Euler hanya berlaku di daerah elastis.

$$\left. \begin{aligned} P_{kr} &= \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \\ \lambda &= \frac{L_k}{i} \text{ atau } L_k^2 = \lambda^2 i^2 \\ I &= i^2 \times A \end{aligned} \right\} \begin{aligned} P_{kr} &= \frac{\pi^2 E i^2 \times A}{\lambda^2 i^2} \\ P_{kr} &= \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{kr} &= \sigma_{kr} \times A \\ P_{kr} &= \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \end{aligned} \right\} \sigma_{kr} \times A = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2}$$

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \rightarrow \lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{kr}}}$$

$$\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{kr}}} \text{ adalah } \lambda_{batas} (\lambda_g)$$

$$\lambda_{\text{batas}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{kr}}}$$

$$\sigma_{kr} = \sigma_1 \text{ maka } \lambda_{\text{batas}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_1}}$$

Akibat pengaruh residual stress maka tegangannya menjadi $0,7 \sigma_1$, sehingga:

$$\lambda_g = \pi \sqrt{\frac{E}{0,7 \sigma_1}} \quad (\text{lihat PPBBI '83 halaman 9})$$

Misalnya, untuk Bj37 mempunyai $\sigma_1 = 2400 \text{ kg/cm}^2$ dan $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$$\lambda_g = \pi \sqrt{\frac{2.100.000}{0,7 \times 2400}} = 111 \quad (\text{lihat tabel dibawah ini})$$

Selanjutnya λ_g untuk bermacam-macam mutu baja dapat dilihat di tabel berikut:

Macam baja	σ_1 (kg/cm ²)	λ_g
Bj 31	2000	122
Bj 37	2400	111
Bj 42	2600	107
Bj 52	3600	91

STABILITAS BATANG TEKAN

Batang tekan harus direncanakan sedemikian rupa sehingga terjamin stabilitasnya (tidak ada bahaya tekuk). Hal ini harus diperlihatkan dengan menggunakan persamaan:

$$\omega \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

di mana:

- N = gaya tekan pada batang
- A = luas penampang batang
- $\bar{\sigma}$ = tegangan dasar (tegangan ijin)

ω = faktor tekuk yang tergantung dari kelangsingan (λ) dan jenis bajanya.

Harga ω dapat dicari dari Tabel 2, 3, 4 atau 5 PPBBI '83 berdasarkan mutu baja Bj 34 (Fe 310), Bj 37 (Fe 360), Bj 44 (Fe 430) dan Bj 52 (Fe 510).

Harga λ ini dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\lambda_g = \pi \sqrt{\frac{E}{0,7 \sigma_1}}$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\lambda_g}$$

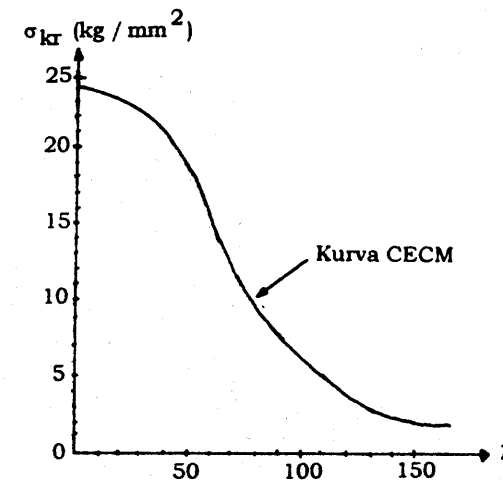
Untuk: $\lambda_s \leq 0,163 \rightarrow$ maka $\omega = 1$

Untuk: $0,183 < \lambda_s < 1 \rightarrow$ maka $\omega = \frac{1,41}{1,593 - \lambda_s}$ } Berdasarkan peraturan Belanda

Untuk: $\lambda \geq 1 \rightarrow$ maka $\omega = 2,281 \lambda_s$ }

HUBUNGAN ANTARA λ DAN ω

Daya dukung batang tekan dipengaruhi oleh panjang batangnya. Seperti terlihat pada gambar di bawah ini, yang merupakan hasil percobaan CECM (*Conversion Europeene de la Construction Metallique*):



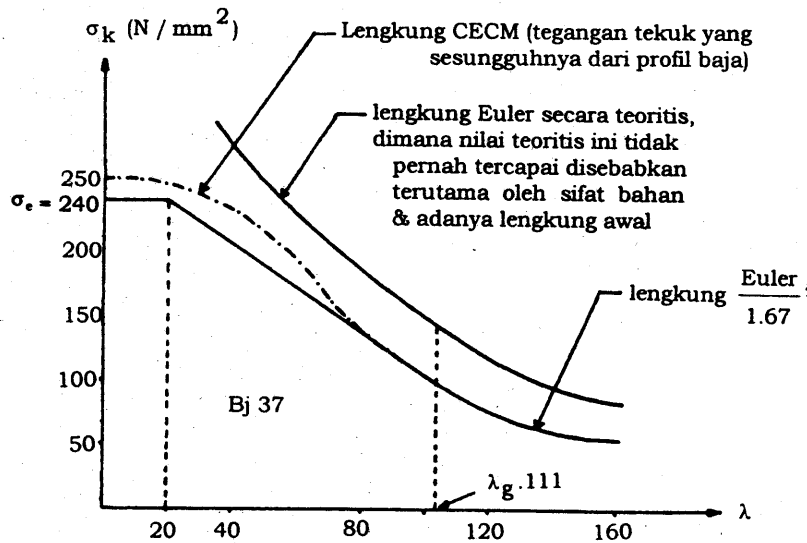
Gambar 5.2

Tampak bahwa pada suatu profil tertentu daya dukungnya akan menjadi berkurang bila panjang tekuk batang bertambah (panjang tekuk bertambah panjang berarti λ bertambah besar).

Apabila batang tekan pendek dibebani, maka ia akan hancur karena seluruh serat pada penampang batang melampaui tegangan lelehnya. Sedangkan pada batang tekan langsing, kehancuran terjadi akibat instabilitas tekuk.

Batas kelangsingan antara kedua pola kehancuran tersebut untuk berbagai jenis baja tidak begitu jelas. Dengan memperhatikan hasil percobaan CECM, maka untuk penyederhanaan dalam perencanaan, batas kelangsingan ini ditentukan $\lambda = 20$ dan $\sigma_e = 2400 \text{ kg/cm}^2$ atau $= 240 \text{ N/mm}^2$.

Meninjau Bj 37



Gambar 5.3

Percobaan CECM menunjukkan bahwa tegangan tekuk yang sesungguhnya adalah jauh lebih rendah dari tegangan tekuk Euler secara teoritis (lihat Gambar 5.3).

Untuk $\lambda > \lambda_g$ berlaku rumus Euler, $\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$

Tegangan ini sebenarnya tidak pernah tercapai, terutama disebabkan oleh sifat bahannya dan adanya lengkung awal dari pabrik atau pada proses konstruksi.

PPBBI kemudian mengambil angka keamanan 1,5 untuk $\lambda \leq 20$, sehingga:

$$\bar{\sigma}_k = \frac{\sigma_1}{1,5} \quad \bar{\sigma}_k = \text{Tegangan tekuk ijin}$$

Sedangkan bagi batang tekan yang mempunyai kelangsingan $\lambda > \lambda_g$ dipakai angka keamanan 2,5 sehingga:

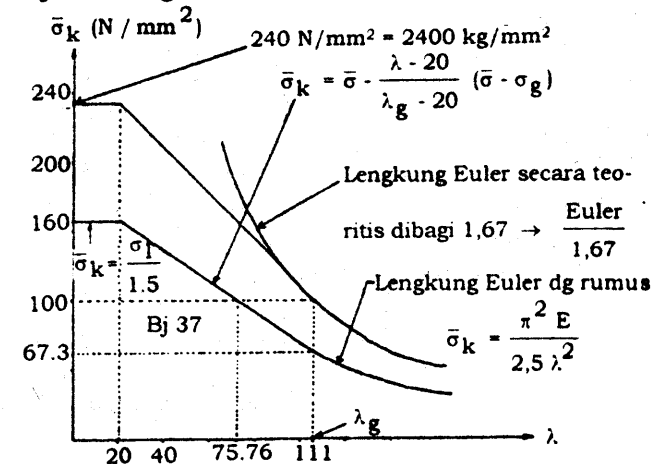
$$\bar{\sigma}_k = \frac{\pi^2 E}{2,5 \lambda^2}$$

Untuk batang tekan yang mempunyai $20 < \lambda < \lambda_g$ secara teoritis adalah rumit.

Untuk interpolasi linear antara $\lambda \leq 20$ dan $\lambda \geq \lambda_g$ dengan rumus sebagai berikut:

$$\bar{\sigma}_k = \bar{\sigma} - \frac{\lambda - 20}{\lambda_g - 20} (\bar{\sigma} - \sigma_g) \quad (\text{garis lurus dengan } \lambda \text{ sebagai variabel})$$

Dengan demikian dapat digambar secara lengkap diagram $\sigma_k - \lambda$ untuk Bj 37 sebagai berikut:



Gambar 5.4

Untuk Fe 360 (Bj 37):

* $\bar{\sigma}_k$ untuk $\lambda \leq 20$

$$\bar{\sigma}_k = \frac{2400}{1,5} = 1600 \text{ kg/cm}^2 = 160 \text{ N/mm}^2$$

* $\bar{\sigma}_k$ untuk $\lambda = \lambda_g = 111$

$$\bar{\sigma}_k = \frac{\pi^2 \times 2.1 \cdot 10^6}{2,5 \times 111^2} = 673 \text{ kg/cm}^2 = 67,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\omega = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_k}$$

Berdasarkan gambar grafik $\bar{\sigma}_k - \lambda$, dengan diketahuinya λ dapat dicari besarnya $\bar{\sigma}_k$.

Dengan diketahuinya $\bar{\sigma}_k$ maka dapat dicari besarnya

$$\omega = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_k}$$

Selanjutnya harga-harga ω ini, berdasarkan kelangsingan λ dapat dicari di dalam Tabel 2, 3, 4, dan 5 sesuai dengan mutu bajanya (lihat PPBBI '83). Untuk meninjau kemampuan batang tekan dapat dilakukan 2 cara sebagai berikut:

1. $\frac{\omega N}{A} \leq \bar{\sigma}$, di mana harga ω dicari dari tabel sesuai dengan kelangsingan λ .
2. $\frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}_{kn}$, di mana $\bar{\sigma}_{kn}$ dibaca di grafik $\bar{\sigma}_{kn} - \lambda$ sesuai dengan kelangsingan λ .

Dari kedua cara ini umumnya lebih enak dipakai cara yang pertama daripada dengan gambar grafik $\bar{\sigma}_{kn} - \lambda$, karena perlu ketelitian yang tinggi.

Bila $\lambda \leq 20$ tidak ada tekuk $\rightarrow \omega = 1$

bila $\lambda > 20$ ada tekuk, harus dicari ω nya.

CONTOH:

Kolom DIR 20 dibebani sentris $N = 100$ ton. Panjang kolom $l = 4,00$ m. Ujung-ujung kolom adalah sendi.

Baja dari Bj 37 dengan $\bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2$.

Tinjaulah kolom ini, apakah cukup kuat!

Jawab:

DIR 20 mempunyai $A = 136 \text{ cm}^2$, $i_x = 8,96 \text{ cm}$ dan $i_y = 5,28 \text{ cm}$. Ujung-ujung kolom sendi, maka $L_k = L = 400 \text{ cm}$

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{\min}} = \frac{400}{5,28} = 75,76 \rightarrow \omega = 1,548 \quad (\text{lihat tabel PPBBI})$$

$$\sigma = \frac{\omega N}{A} = \frac{1,548 \times 100.000}{136}$$

$$= 1138 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Cara lain:

Dengan grafik $\bar{\sigma}_{kn} - \lambda$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{100.000}{136} = 735 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Pada grafik: } \lambda = 75,76 \rightarrow \bar{\sigma}_k = 100 \text{ N/mm}^2 \\ = 1000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Jadi } \sigma = 735 < 1000 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

MENDIMENSI BATANG TEKAN

Untuk mendimensikan batang tekan dikerjakan dengan urutan sebagai berikut:

- I. Profil ditaksir dengan $\lambda \geq 111$ sehingga berlaku rumus Euler:

$$I_{\min} = \frac{n P L_k^2}{\pi^2 E} = \frac{n \times 1000 P \times 10000 L_k^2}{10 \times 2,1 \times 10^6}$$

$$= 0,484 n P L_k^2$$

P = beban sentris dalam ton

L_k = panjang tekuk dalam m

E = modulus elastisitas baja = $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

$$\pi^2 \approx 10$$

$n \approx 3,04$ untuk Bj 37

Jadi untuk $\bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow I_{\min} = 1,5 L_k^2$

Catatan: pada rumus ini P dalam ton, L_k dalam m dan hasil I_{\min} dalam cm^4 .

II. Dengan I_{\min} dapat dipilih nomor profil dari batang. (Sebenarnya tanpa menggunakan rumus I_{\min} ini dapat juga diperkirakan ukuran batangnya. Hanya saja dengan cara ini mungkin dengan beberapa kali mencoba-cobanya baru akan sesuai). Kemudian profil diperiksa apakah sudah cukup kuat atau belum.

Daya muat profil terhadap sumbu yang terlemah harus diperiksa dan hasilnya harus lebih besar dari besarnya muatan yang dipikul.

III. Kalau $P \geq P$ beban, profil dapat dipakai.

Kalau $\bar{P} < P$ beban, berarti batang tidak kuat dan profil harus diperbesar satu nomor lagi.

CONTOH:

1. Kolom tunggal dari DIN, panjang tekuk $L_k = 600 \text{ cm}$, menahan beban sentris $N = 35 \text{ ton}$, $\bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2$

Ditanyakan:

- Nomor profil yang dipakai.
- Periksalah berapa daya dukungnya.

Jawab:

Untuk $\bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2$, ditaksir dengan

$$I_{\min} = 1,5 P L_k^2$$

$$I_{\min} = 1,5 \times 35 \times 6^2 = 1890 \text{ cm}^4$$

Dicari di tabel baja profil DIN dengan $I_{\min} = I_y$ atau sedikit lebih besar dari $1890 \text{ cm}^4 \rightarrow$ terdapat

$I_y = 2140 \text{ cm}^4$ untuk DIN 20.

DIN 20 mempunyai $I_x = 5950 \text{ cm}^4$, $i_x = 8,48$

$I_y = 2140 \text{ cm}^4$, $i_y = 5,1$

$A = 82,7 \text{ cm}^2$

Diperiksa daya dukungnya:

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{\min}} = \frac{600}{5,1}$$

$$= 117,64 > 111 \text{ (berlaku Euler dalam keadaan elastis)}$$

$$\omega = 2,671$$

$$\frac{\omega \bar{N}}{A} = \bar{\sigma}_d \rightarrow \bar{N} = \frac{A \bar{\sigma}_d}{\omega} = \frac{82,7 \times 1600}{2,671}$$

$$= 49539 \text{ kg} > 35000 \text{ (OK)}$$

2. Kolom tunggal DIE 20 ujung-ujungnya sendi memikul beban sentris N.

Panjang kolom $L = 3,60 \text{ m} = L_k$

Hitunglah berapa N_{\max} yang dapat dipikul kolom.

Jawab :

DIE 20 mempunyai : $A = 57 \text{ cm}^2$; $i_x = 8,24 \text{ cm}$;
 $i_y = 4,96 \text{ cm}$

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{\min}} = \frac{360}{4,96} = 73 < 111 \text{ (inelastic buckling)}$$

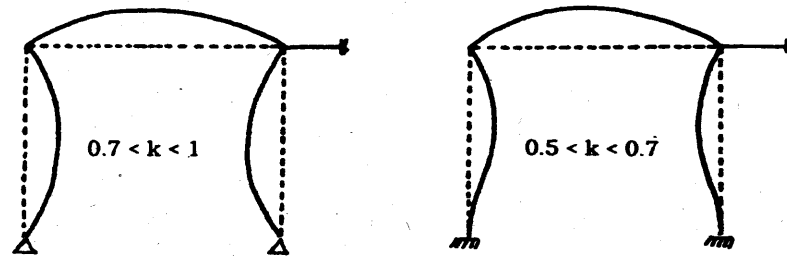
$$\lambda = 73 \rightarrow \omega = 1,507$$

$$\bar{N} = \frac{A \bar{\sigma}_d}{\omega} = \frac{57 \times 1600}{1,507} = 60517 \text{ kg}$$

PANJANG TEKUK (EFFECTIVE LENGTH)

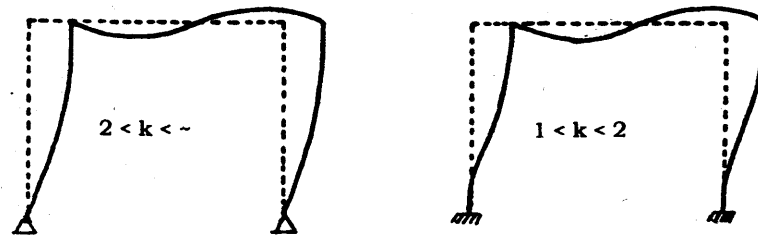
Panjang tekuk ideal seperti yang terdapat pada halaman 18 PPBBI dalam prakteknya jarang sekali dijumpai. Umumnya keadaan ujung-ujung batang tekan dipengaruhi oleh bagian-bagian konstruksi yang berhubungan dengannya. Misalnya untuk suatu portal simetris didapatkan sebagai berikut:

I. Portal yang mempunyai lateral support, hingga tak dapat bergoyang ke samping.



Gambar 5.5

II. Portal yang dapat bergoyang.

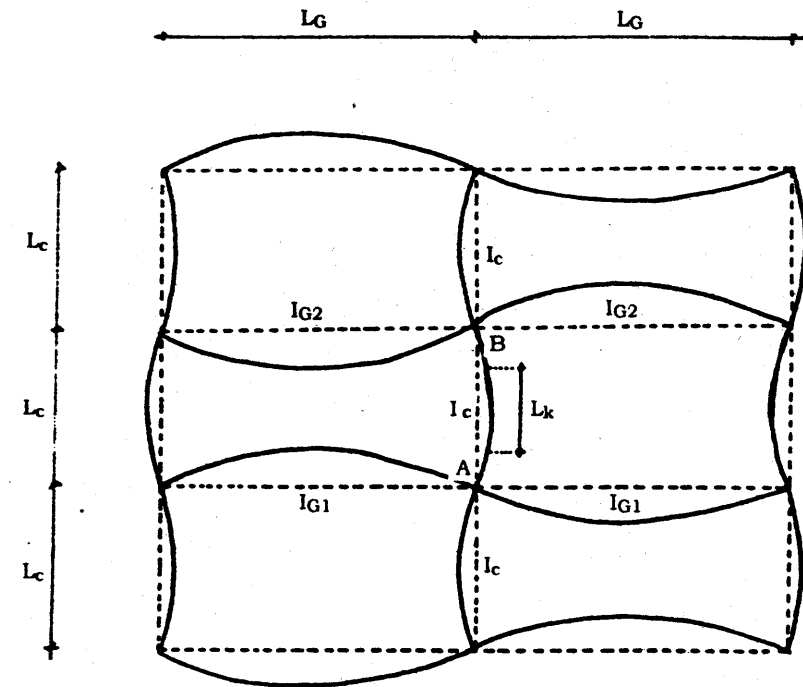


Gambar 5.6

Panjang tekuk (*effective length*) kolom dari suatu bangunan bertingkat dengan *rigid connections* dapat dihitung dengan "Alignment Chart for effective length of Columns in Continuous frame" (Nomogram 1 PPBBI), di mana:

$$G = \frac{\sum I_{\text{columns}} / L_{\text{columns}}}{\sum I_{\text{girders}} / L_{\text{girders}}}$$

Misalnya pada *multi storey frame buckling* seperti gambar di bawah ini, bila akan mencari panjang tekuk kolom AB ialah = $k L$



Gambar 5.7

Girder dan kolom yang bertemu di titik A, tidak sama besar dan panjangnya.

Kolom dengan panjang = L_c dan mempunyai $I = I_c$
Girder dengan panjang = L_G dan mempunyai $I = I_{G1}$

Demikian juga pertemuan kolom dan girder di titik B, tidak sama besar dan panjangnya.

Kolom dengan panjang = L_c dan mempunyai $I = I_c$
Girder dengan panjang = L_G dan mempunyai $I = I_{G2}$

Oleh sebab itu untuk G_A dan G_B dipakai rumus sebagai berikut:

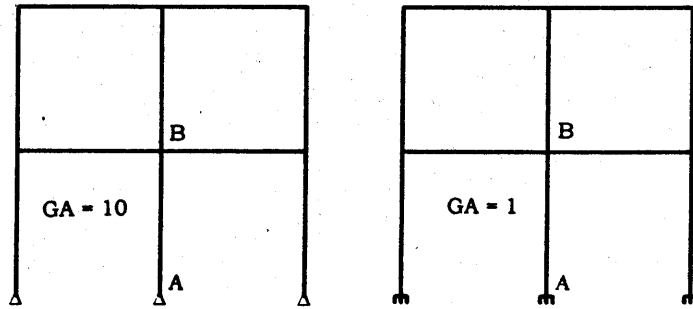
$$G_A = \frac{\sum(I_C / L_C)}{\sum(I_{G1} / L_G)} \text{ dan } G_B = \frac{\sum(I_C / L_C)}{\sum(I_{G2} / L_G)}$$

Indeks C = menunjukkan column

Indeks G = menunjukkan girder

Pada perletakan (A = perletakkan)

- Bila perletakan sendi, maka $G_A = \infty$, menurut CRC (*Column Research Council*) dimodifikasi menjadi $G_A = 10$.
- Bila perletakan adalah jepit, maka $G_A = 0$, menurut CRC dimodifikasi menjadi $G_A = 1$.



Jelasnya, menurut CRC:

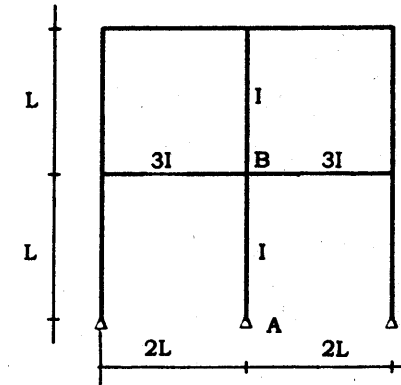
- Pada perletakan sendi : $G_A = 10$
- Pada perletakan jepit : $G_A = 1$

Bila ujung yang lain dari girder (yang berhubungan dengan kolom yang ditinjau) merupakan *simple connection* (yang tidak menahan momen), maka faktor (I_G/L_G) harus dikalikan dengan 1,5 untuk portal yang tak bergoyang, dan dikalikan dengan 0,5 untuk portal yang bergoyang.

CONTOH:

1. Tentukan harga k untuk kolom AB dari portal bertingkat di bawah ini, bila:
 - a. portal tidak bergoyang
 - b. portal bergoyang

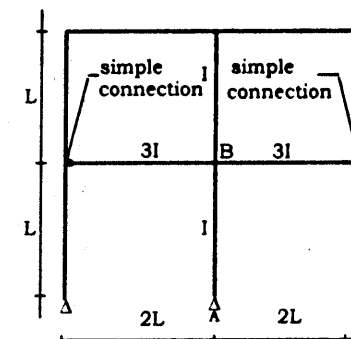
Perletakan sendi.



Jawab:

- a. $G_A = 10$
- b. $G_B = \frac{2(I/L)}{2(3I/2L)}$
 $= 0,667 \approx 0,7$
 $k = 0,83$
- c. $G_A = 10$
 $= 0,667 \approx 0,7$
 $k = 1,82$

2. Idem no 1, tetapi girder pada ujung yang lain merupakan *simple connection*.



Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } G_A &= 10 \\ G_B &= \frac{2(I/L)}{2(1,5 \times 3I/2L)} \\ &= 0,444 \\ k &= 0,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } G_A &= 10 \\ G_B &= \frac{2(I/L)}{2(0,5 \times 3I/2L)} \\ &= 1,33 \\ k &= 1,9 \end{aligned}$$

-ooOoo-

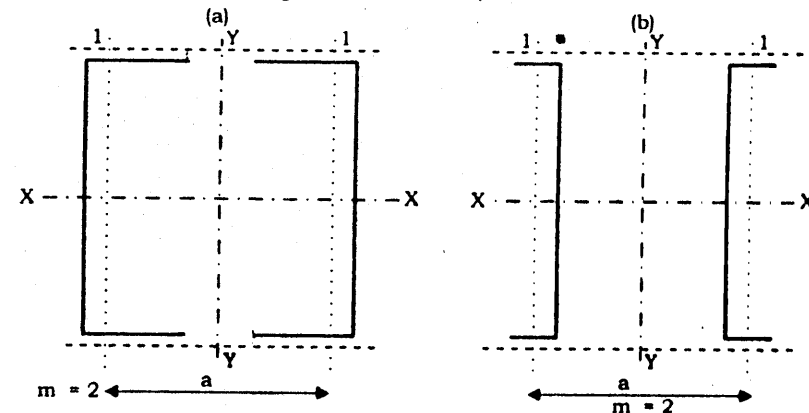


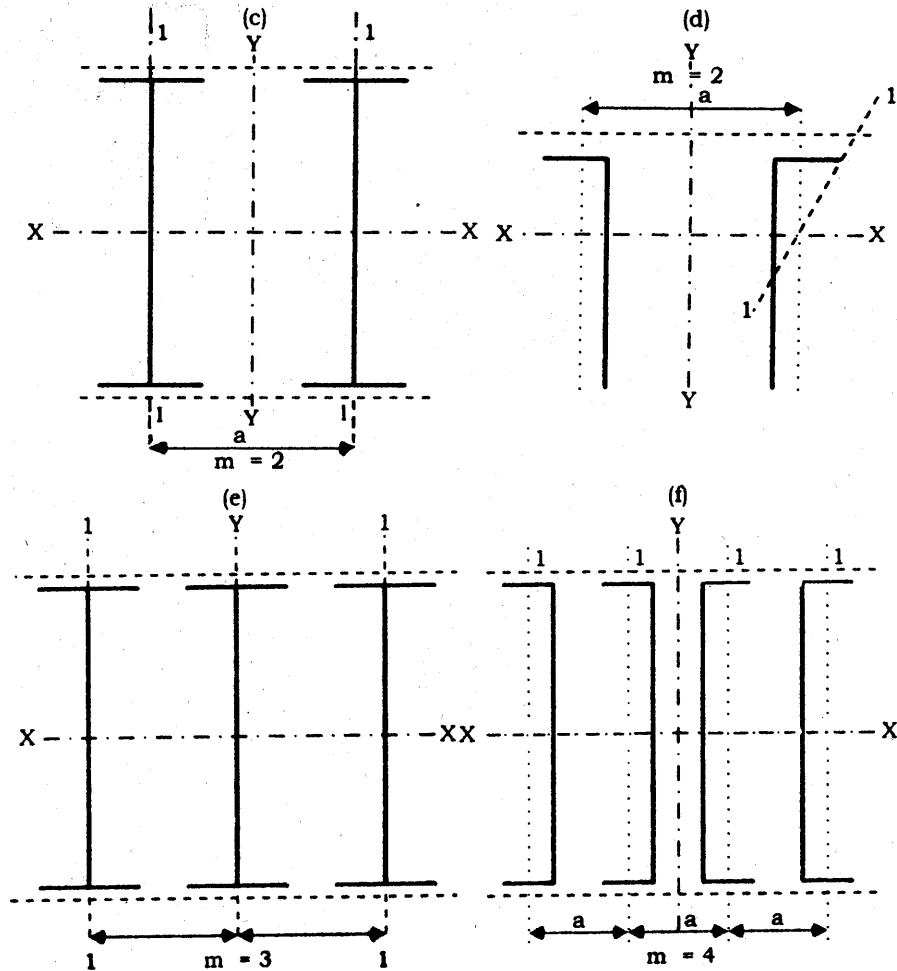
PROFIL GABUNGAN (PROFIL TERSUSUN)

- Pada kolom atau batang tekan yang panjang dengan beban yang berat (misalnya pada rangka jembatan), pemakaian profil tunggal tidaklah hemat karena lebih berat daripada profil tersusun pada umumnya.
- Pada profil tersusun, jarak antar profil dapat diatur, sehingga momen inertiya (I) terhadap semua sumbu dapat memenuhi kebutuhan.
Agar ekonomis dapat diatur sedemikian rupa sehingga didapat $I_x = I_y$.
- Profil tersusun dari profil-profil yang kecil, tipis dan ringan, tetapi dapat menghasilkan I yang besar.

BERBAGAI MACAM PROFIL TERSUSUN

Ada berbagai macam profil tersusun, antara lain:





Gambar 6.1

Profil tersusun mempunyai 2 macam sumbu, yaitu sumbu bahan dan sumbu bebas bahan. Sumbu bahan adalah sumbu yang memotong semua profil. Sumbu bebas bahan adalah sumbu yang tidak memotong semua profil.

X - X adalah sumbu bahan.

Y - Y adalah sumbu bebas bahan.

1 - 1 adalah sumbu minimum dari elemen batang (satu profil).

--- adalah pelat koppel.

Pada profil tersusun yang mempunyai sumbu bebas bahan, supaya batang-batang yang disusun dapat bekerja sama, tempat-tempat tertentu harus dihubungkan satu sama lain dengan pelat koppel, sehingga:

- Untuk profil tersusun macam a, b, c dan d berlaku:

$$I_y = 2 [I_{y1} + A_1(0,5 a)^2]$$

- Untuk profil tersusun macam e berlaku:

$$I_y = 3 I_{y1} + 2 A_1 a^2$$

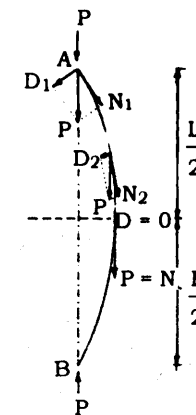
- Untuk profil tersusun macam f berlaku:

$$I_y = 4 I_{y1} + 2 A_1(1,5 a)^2 + 2 A_1(0,5 a)^2$$

Y adalah sumbu bebas bahan. A_1 adalah luas penampang satu profil.

FUNGSI PELAT KOPPEL

1. Memperkecil panjang tekuk batang-batang tunggal (L_y dibagi-bagi menjadi L_1 oleh pelat-pelat koppel).
2. Mencegah gaya geser memanjang yang timbul sewaktu batang melekok.
3. Menggabungkan kedua profil agar dapat bekerja sama, sehingga dapat mempertahankan bentuk tetap dari penampang.



Gambar 6.2

Batang AB ditekan dengan gaya P, maka batang akan melekok seperti terlihat pada Gambar 6.2.

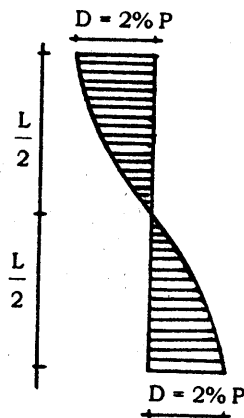
Pada titik A akan terjadi gaya lintang D_1 yang lebih besar dari gaya lintang D_2 di titik C. Makin jauh dari A, gaya lintang D semakin kecil dan di tengah-tengah panjang batang ($0,5 L$) gaya lintang $D = 0$.

Jadi gaya lintang D yang terbesar berada tepat di ujung-ujung batang.

Jadi ujung-ujung batang harus diberi pelat koppel yang kuat agar dapat menahan gaya lintang D, yang berusaha untuk memisahkan profil yang tersusun. Pemasangan pelat koppel di antara pelat-pelat koppel ujung, selanjutnya dapat sama dengan pelat koppel ujung (lebih aman).

Sebenarnya tugas pelat-pelat koppel di antara pelat-pelat koppel ujung lebih ringan, lebih-lebih di daerah tengah batang, di mana $D = 0$.

Bentuk diagram gaya lintang sepanjang batang adalah sebagai berikut:



Besarnya gaya lintang D di ujung-ujung batang tekan adalah $0,02 P$, di mana P adalah beban tekan normal.

Apabila batang selain memikul beban aksial juga memikul beban yang tegak lurus sumbu batang atau memikul momen, maka besarnya gaya lintang diambil yang terbesar dari $D = 0,02 P$ dan gaya lintang yang sungguh-sungguh terjadi karena gaya-gaya tegak lurus sumbu batang tadi.

Untuk batang tersusun harus ditinjau kestabilannya terhadap kedua sumbu bebas bahan, sebagai berikut:

Terhadap sumbu bahan ($x - x$)

Kelangsingannya adalah

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x}$$

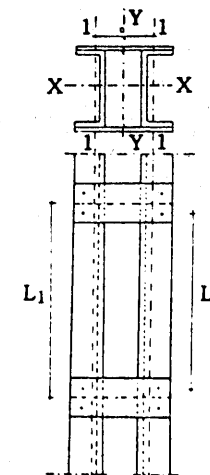
Terhadap sumbu bebas bahan ($y - y$)

Kelangsingannya adalah

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + 0,5 m \lambda_1^2}$$

λ_{iy} = kelangsingan ideal

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} \quad \text{dan} \quad \lambda_1 = \frac{L_1}{i_{\min}}$$



Gambar 6.3

di mana:

m = jumlah batang tunggal yang membentuk batang tersusun

L_{ky} = panjang tekuk batang tersusun pada arah \perp sumbu Y-Y

i_y = jari-jari kelembaman dari batang tersusun pada arah \perp sumbu Y - Y

L_1 = jarak antara tengah-tengah pelat koppel pada arah batang

i_{min} = jari-jari kelembaman batang tunggal terhadap sumbu yang memberikan harga terkecil (sumbu 1-1)

Jarak L_1 yang sebenarnya ialah L_1' , tetapi karena adanya paku keling/baut baru kemudian, untuk memudahkan diambil L_1 adalah jarak antara tengah-tengah pelat koppel. $L_1 \geq L_1'$ (lebih aman)

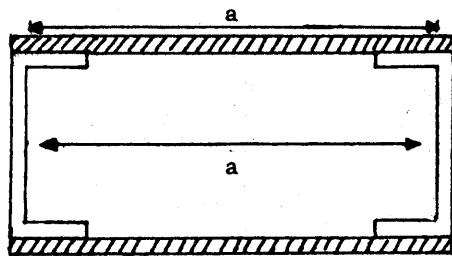
Syarat:

1. Pelat koppel membagi batang tersusun menjadi beberapa bagian yang sama panjang.
2. Banyaknya pembagian batang minimum 3 bagian.
3. Hubungan antara pelat koppel dengan elemen batang tekan harus kaku.
4. Pelat koppel harus cukup kaku hingga memenuhi:

$$\frac{I_p}{a} \geq 10 \frac{I_1}{L_1}$$

di mana:

I_p = momen kelembaman plat koppel



$$I_p = 2 \times \frac{1}{12} t h^3$$

I_1 = momen kelembaman elemen batang tunggal terhadap sumbu 1 - 1

a = jarak antara pusat berat masing-masing elemen

5. ω_x dicari dari λ_x

ω_{iy} dicari dari λ_{iy}

sehingga:

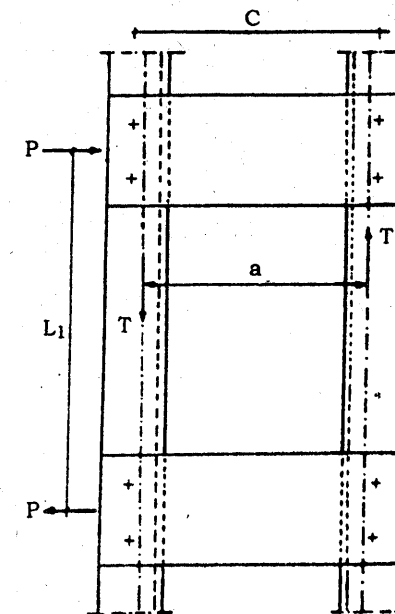
$$\omega_x \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma} \quad \text{dan} \quad \omega_{iy} \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

6. Untuk kestabilan elemen-elemen dari batang tersusun, syarat-syarat berikut harus dipenuhi:

$$\lambda_x \geq 1,2 \lambda_1$$

$$\lambda_{iy} \geq 1,2 \lambda_1$$

$$\text{dan } \lambda_1 \leq 50$$



Gambar 6.4

Akibat gaya lintang yang bekerja pada tempat-tempat pelat koppel, timbul gaya geser memanjang T yang mengimbangi gaya lintang tadi sehingga:

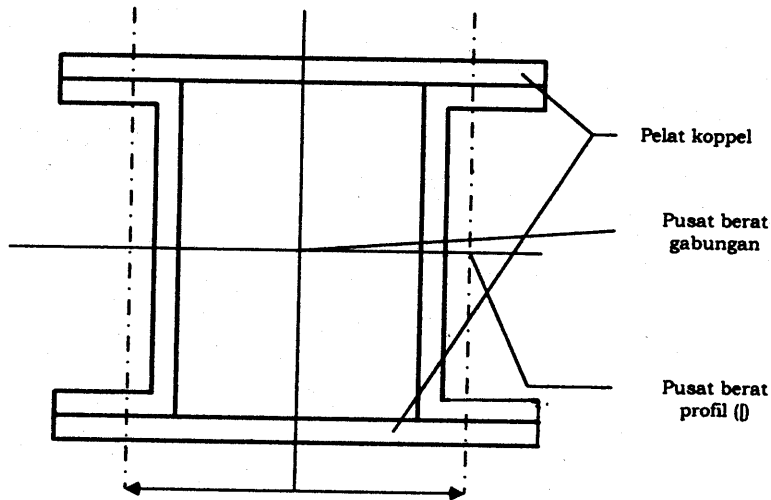
$$D \times L_1 = T \times a$$

$$T = \frac{D \times L_1}{a}$$

Pelat koppel dipasang setangkup, maka tiap plat koppel menahan gaya $\frac{1}{2} T$

c = jarak antara paku keling/baut

Tempat paku keling/baut tidak berimpit dengan pusat berat tiap elemen.



Gambar 6.5

Untuk mendefinisikan pelat koppel dipakai rumus-rumus sebagai berikut:

a. Untuk kolom dengan 2 batang tunggal: $T = \frac{DL_1}{a}$

b. Untuk kolom dengan 3 batang tunggal: $T = \frac{DL_1}{2a}$

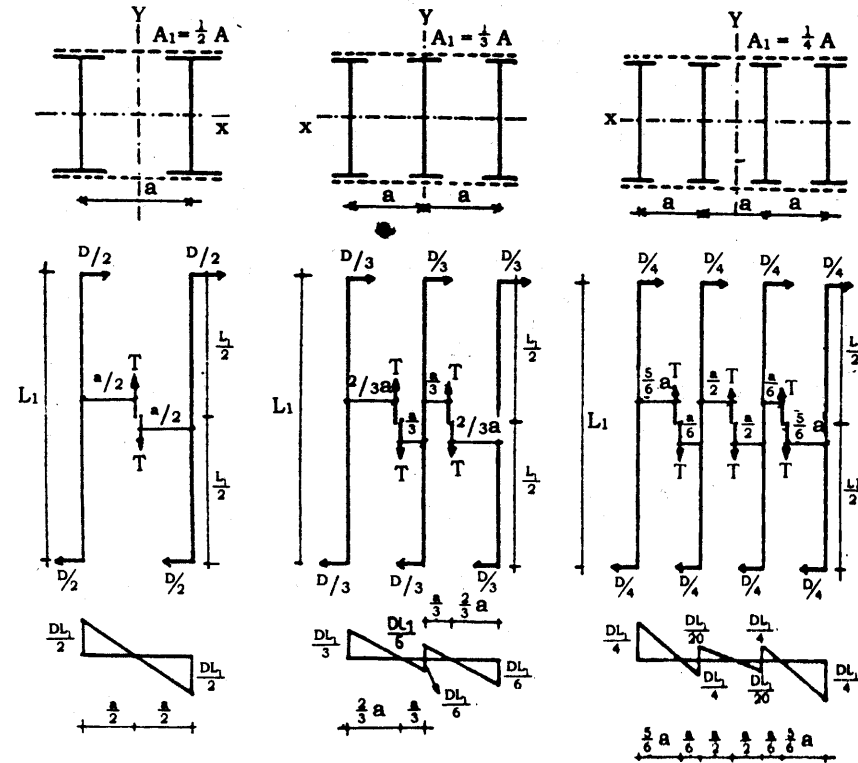
c. Untuk kolom dengan 4 batang tunggal: $T' = 0,5 \frac{DL_1}{a}$

$$T'' = 0,3 \frac{DL_1}{a}$$

Disini sebetulnya $T' = 0,4 \frac{DL_1}{a}$. Di PPBBI diambil $T' = 0,5 \frac{PL_1}{a}$

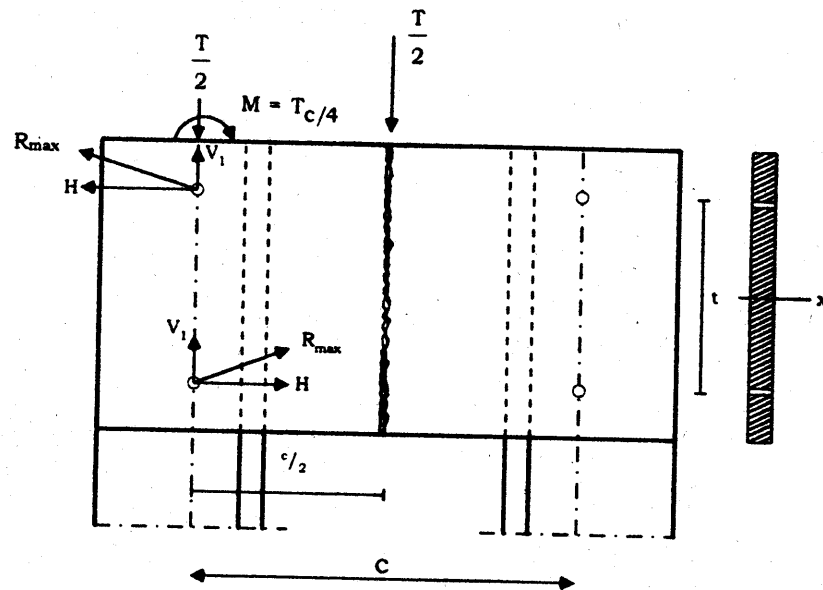
(lebih aman)

Untuk rumus-rumus di atas, titik di mana momen = 0 dianggap terletak pada seperti yang terlihat pada Gambar 6.6



Gambar 6.6

MENINJAU PELAT KOPPEL



Gambar 6.7

Pada satu pelat koppel, maka gaya geser yang ditahan oleh pelat koppel ialah $\frac{1}{2}T$.

Pelat koppel dipotong di tengah-tengah, di mana bekerja gaya geser $\frac{1}{2}T$. (lihat gambar 6.6)

Akibat gaya $\frac{1}{2}T$ ini pada sambungan timbul gaya $\frac{1}{2}T$ dan momen M .

$$M = \frac{1}{2}T \times \frac{1}{2}c = \frac{1}{4}Tc$$

Jadi pelat koppel dan alat penyambungannya menahan momen sebesar $M = \frac{1}{4}Tc$ dan gaya geser $\frac{1}{2}T$.

Misalnya dipakai alat penyambung paku keling.

DITINJAU PAKU KELINGNYA

Paku keling menahan: - gaya geser $\frac{1}{2}T$
- momen $\frac{1}{4}Tc$

Lihat Gambar 6.7

$M = \frac{1}{4}Tc$ diimbangi oleh paku keling dengan $H \times e$, sehingga:

$$He = \frac{1}{4}Tc$$

$$H = \frac{Tc}{4e}$$

Gaya geser $\frac{1}{2}T$ ditahan oleh kedua paku keling masing-masing = V_1 , sehingga:

$$\frac{1}{2}T = 2V_1 \rightarrow V_1 = \frac{1}{4}T$$

Maka gaya reaksi yang dipikul satu paku keling:

$R_{max} = \sqrt{H^2 + V_1^2}$ dan harga ini harus $\leq \bar{P}$ (daya dukung paku keling)

DITINJAU PELAT KOPPELNYA

Tegangan yang timbul pada pelat koppel harus sama atau lebih kecil dari:

$$\bar{\sigma}_{lentur} = \sigma \text{ (tegangan dasar)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W_{x \text{ netto}}} \leq \bar{\sigma}$$

Dipakai $W_{x \text{ netto}}$ karena luas penampang yang berbahaya ialah di tempat lubang.

DITINJAU TEGANGAN GESERNYA

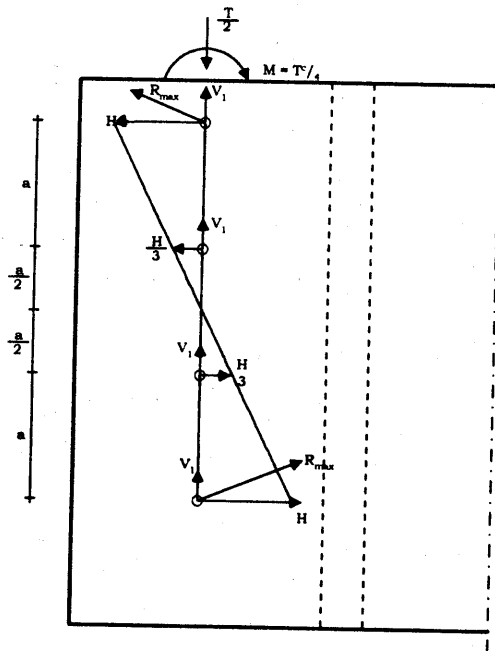
Tegangan geser yang terjadi harus $\leq \bar{\tau}$, sehingga

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \times \frac{\frac{1}{2}T}{bh} \leq \bar{\tau} = 0,6 \bar{\sigma}$$

Catatan:

Mengenai lentur dan geser ini akan dijelaskan lebih lanjut nanti pada bab yang membahas soal batang lentur.

Bila dipakai 4 paku keling/baut atau lebih, gaya-gaya reaksi horisontal pada paku keling/ baut dapat dicari sebagai berikut:



$$M = \frac{1}{4} T c$$

$$M' = H \times 3a + \frac{1}{3} H \times a$$

$$M = M'$$

$$\frac{1}{4} T c = 3 a H + \frac{1}{3} a H$$

$$\frac{1}{4} T c = H (3a + \frac{1}{3} a)$$

$$\frac{1}{4} T c = 3 \frac{1}{3} a (H)$$

$$H = \frac{\frac{1}{4} T c}{3 \frac{1}{3} a}$$

$$\frac{T}{2} = 4V_1 \rightarrow V_1 = \frac{T}{8}$$

$$R_{\max} = \sqrt{H^2 + V_1^2} \leq \bar{P} \text{ paku keling/baut}$$

Yang ditinjau ialah paku keling/baut yang teratas atau terbawah, di mana mempunyai R terbesar.

MENDIMENSI PROFIL TERSUSUN

Seperti halnya pada profil tunggal, pada profil tersusun untuk batang tekan juga dapat dipakai rumus taksiran agar lebih cepat mendapatkan ukuran-ukuran batang yang memenuhi kebutuhan.

PEDOMAN MENGHITUNG PROFIL TERSUSUN

- I. Profil ditaksir dengan $I_{\min} = 1,5 P L_k^2$ untuk Bj 37 (lihat profil tunggal).
- II. Daya muat terhadap sumbu bahan (sumbu X - X) diperiksa dan hasilnya harus \geq beban P.
- III. Kalau $\bar{P} > P$ perhitungan dapat diteruskan.
Kalau $\bar{P} < P$ maka profil harus diperbesar satu nomor lagi.

Contoh:

Sebuah kolom $||$ mempunyai panjang tekuk $L_x = L_y = 6 \text{ m}$ memiliki beban terpusat 50 ton, $\bar{\sigma}_d = 1600 \text{ kg/cm}^2$.

Jawab:

- a. $I_{\min} = 1,5 P L_k^2 = 1,5 \times 50 \times 6^2 = 2700 \text{ cm}^2$
 Dengan $P = 50 \text{ ton}$, ini berarti untuk 2 profil ($||$)
 Untuk profil $||$: $I = 0,5 \times 2700 = 1350 \text{ cm}^4$
 Dicari di daftar konstruksi baja $||$ yang mempunyai $I_x > 1350 \text{ cm}^4$ ialah $|| 18$ mempunyai:

$$I_x = 1350 \text{ cm}^4 \quad i_x = 6,95 \text{ cm}$$

$$I_y = 114 \text{ cm}^4 \quad i_y = 2,02 \text{ cm}$$

$$\text{dan } A = 28 \text{ cm}^2$$

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x} = \frac{600}{6,95} = 86,5 \rightarrow \omega_x = 1,722$$

$$\omega_x \frac{\bar{N}}{A} = \bar{\sigma} \rightarrow \bar{N} = \frac{\bar{\sigma} A}{\omega_x} = \frac{1600 \times 2 \times 28}{1,722}$$

$$= 52.033 \text{ kg}$$

> 50.000 kg (OK)

- b. Menurut Peraturan Jerman:

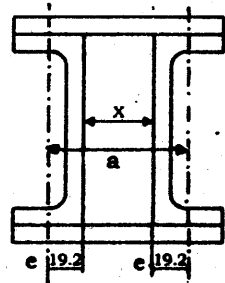
Bila jarak antara pusat berat kedua profil (a) lebih besar dari tinggi profil (nomor profil), maka kekuatan pelat koppel beserta pelengkapannya tinggal 80%.

Karena itu supaya tidak mengalami reduksi menjadi 80%, sebaiknya jarak pusat berat kedua profil dibuat \approx tinggi profil = 18 cm

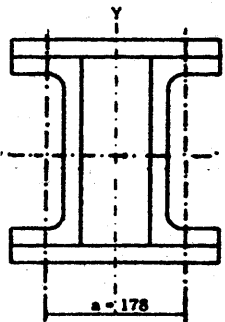
$$e \text{ dari } || 18 = 19,2 \text{ mm}$$

$$x + 2 \times 19,2 = 180 \text{ (lihat gambar)}$$

$$x = 180 - 38,4 \text{ mm} = 141,6 \text{ mm} \approx 140 \text{ mm}$$



$$\begin{aligned} a &= x + 2 \cdot 19,2 = 140 + 38,4 \\ &= 178,4 \text{ mm} \\ &\approx 178 \text{ mm} \end{aligned}$$



$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} = \frac{600}{i_y}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{2A}}$$

$$\begin{aligned} I_y &= 2[114 + 28 \times (\frac{1}{2} \times 17,8)^2] \\ &= 4663,78 \end{aligned}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{4663,76}{2 \times 28}} = 9,13 \text{ cm}$$

$$\lambda_y = \frac{600}{9,13} = 65,7$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2}$$

$$m = 2 \rightarrow \lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$$

Batang tersusun ini akan efektif bila $\lambda_{iy} = \lambda_x$

$$\lambda_{iy} = \lambda_x = 86,5$$

maka:

$$86,5 = \sqrt{65,7^2 + \lambda_1^2}$$

$$86,5^2 = 65,7^2 + \lambda_1^2$$

$$\lambda_1^2 = 86,5^2 - 65,7^2 = 3165,78$$

$$\lambda_1 = 56,3$$

$$\lambda_1 = \frac{L_1}{i_{\min}} \rightarrow 56,3 = \frac{L_1}{2,02} \rightarrow L = 114 \text{ cm}$$

Secara teoritis jarak antara $L_1 \text{ max} = 114 \text{ cm}$

Pada pelaksanaan dibuat demikian:

Panjang batang $L = 600 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \text{Banyaknya lapangan} &= \frac{600}{114} = 5,28 \text{ lapangan} \\ &\approx 6 \text{ lapangan} \end{aligned}$$

$$\text{Jadi } L_1 \text{ pada kenyataannya} = \frac{600}{6} = 100 \text{ cm}$$

Catatan:

Pemakaian baja rangkap untuk kolom sebenarnya jarang dalam praktek. Biasanya profil rangkap ini banyak dipakai sebagai batang dari rangka untuk jembatan.

Selanjutnya perlu dikontrol kestabilan dari elemen-elemen batang tersusun sebagai berikut:

Syarat: $\lambda_1 \leq 50$

$$\lambda_{ix} \geq 1,2 \lambda_1$$

$$\lambda_{iy} \geq 1,2 \lambda_1$$

$$\lambda_1 = \frac{L_1}{i_y} = \frac{100}{2,02} = 49,5 < 50 \text{ (OK)}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{ix} &= 86,5 \\ 1,2 \lambda_1 &= 1,2 \times 49,5 = 59,52 \end{aligned} \right\} \text{ (OK)}$$

$$\lambda_y = 65,7$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$$

$$= \sqrt{65,7^2 + 49,5^2}$$

$$= 82,26$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{iy} &= 82,26 \\ 1,2 \lambda_1 &= 1,2 \times 49,6 = 59,52 \end{aligned} \right\} \text{ (OK)}$$

Merencanakan plat koppel dan menyambungnya:

$$\frac{I_p}{a} \geq \frac{10 I_1}{L_1} \rightarrow \frac{2 \times \frac{1}{12} 0,7 h^3}{a} \geq \frac{10 I_1}{L_1}$$

$a = 17,8 \text{ cm}$ $L_1 = 100 \text{ cm}$ $I_y = 114 \text{ cm}^4$

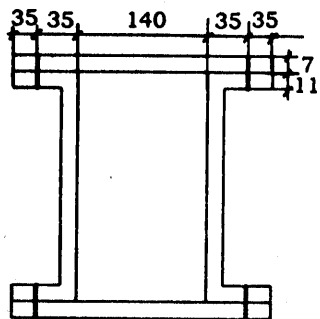
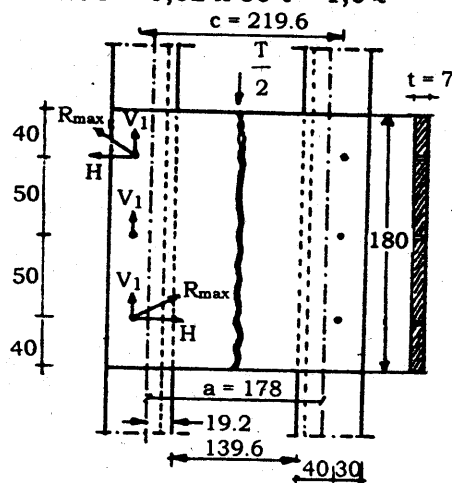
$$h^3 \geq \frac{60 \times 17,8 \times 114}{0,7 \times 100} \text{ (t diambil 7 mm = 0,7 cm)}$$

$h^3 = 1709 \rightarrow h \geq 12 \text{ cm}$

Jadi dipakai pelat $h = 18 \text{ cm}$

plat koppel 7×180 dipakai pk $\phi 20 \text{ mm}$

$D = 2\% P = 0,02 \times 50 \text{ t} = 1,0 \text{ t}$



$$T = \frac{D \cdot L_1}{a} = \frac{1 \times 100}{17,8}$$

$= 5,62 \text{ t}$

$$M = \frac{1}{4} T c$$

$$= \frac{1}{4} \times 5,62 \times 21,96$$

$$= 30,85 \text{ t cm}$$

$M = H \times 10$
 $30,85 = H \times 10$
 $H = 3,085 \text{ t}$

$$V_1 = \frac{1}{2} T = \frac{5,62}{2}$$

$$= 0,937 \text{ t}$$

$$R_{max} = \sqrt{3,085^2 + 0,937^2}$$

$$= 3,224 \text{ t}$$

beban terbesar yang dipikul oleh sebuah paku adalah $= 3,224 \text{ t}$

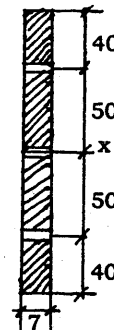
Ditinjau kekuatan paku keling:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi d^2 \bar{r} = \frac{1}{4} \pi \times (2)^2 \times 0,8 \times 1,6 = 4,02 \text{ t}$$

$\bar{P} = 0,7 \times 2 \times 1,6 \times 1,6 = 3,584 \text{ t}$

$\bar{P} = 3,584 \text{ t} > 3,224 \text{ t (OK)}$

Ditinjau kekuatan plat kopel:



$$I_x = \frac{1}{12} \times 0,7 \times 18^3 = 340 \text{ cm}^4$$

$$I_{lubang} = 2 \times 2 \times 0,7 \times 5^2 = 70 \text{ cm}^4$$

$I_{netto} = 270 \text{ cm}^4$

$$W_n = \frac{I_n}{y} = \frac{270}{9} = 30 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{M}{W_n} = \frac{30,85}{30} = 1,028 \text{ t / cm}^2$$

$\sigma = 1028 \text{ kg / cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg / cm}^2$

Ditinjau terhadap geser:

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{2} \frac{T}{th} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{5,62}{0,7 \times 18} = 0,334 \text{ t / cm}^2$$

$\tau_{max} = 334 \text{ kg / cm}^2 < 0,58 \times 1600 = 928 \text{ kg / cm}^2 \text{ (OK)}$

BATANG TERSUSUN DENGAN PENGHUBUNG BATANG-BATANG DIAGONAL

Selain menggunakan pelat kopel, elemen-elemen batang dari batang tersusun dapat juga dihubungkan dengan batang diagonal seperti yang terlihat pada Gambar 6.8.

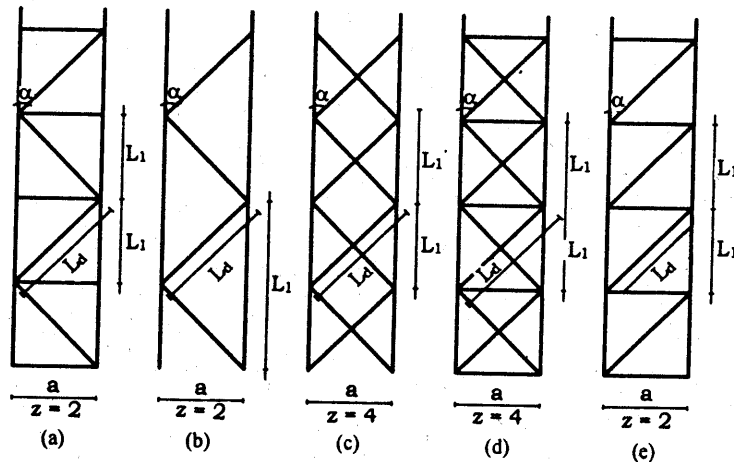
Batang tersusun yang dihubungkan dengan batang diagonal

Untuk menghitung kelangsingan batang-batang tersusun yang dihubungkan dengan batang-batang diagonal seperti pada Gambar 6.8a, b, c, dan d berlaku rumus-rumus:

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x} \geq 1,2 \lambda_1 \quad \lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2} \geq 1,2 \lambda_1$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A L d^3}{Z A_d L_1 a^2}} \leq 50$$



Gambar 6.8

di mana:

- A = luas penampang batang tersusun
- A_d = luas penampang batang diagonal
- L_d = panjang batang diagonal
- L₁ = panjang elemen batang yang dibatasi 2 ujung batang penghubung
- a = jarak sumbu elemen-elemen batang tersusun
- z = konstanta yang tercantum pada masing-masing Gambar 6.8

Pada batang tersusun yang dihubungkan dengan batang diagonal yang searah (Gambar 6.8e), λ₁ dapat dicari dengan rumus berikut:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A L d^3}{Z A_d L_1 a^2} + \frac{A_a}{2 A_h L_1}}$$

di mana:

A_h = luas penampang satu batang penghubung horisontal.

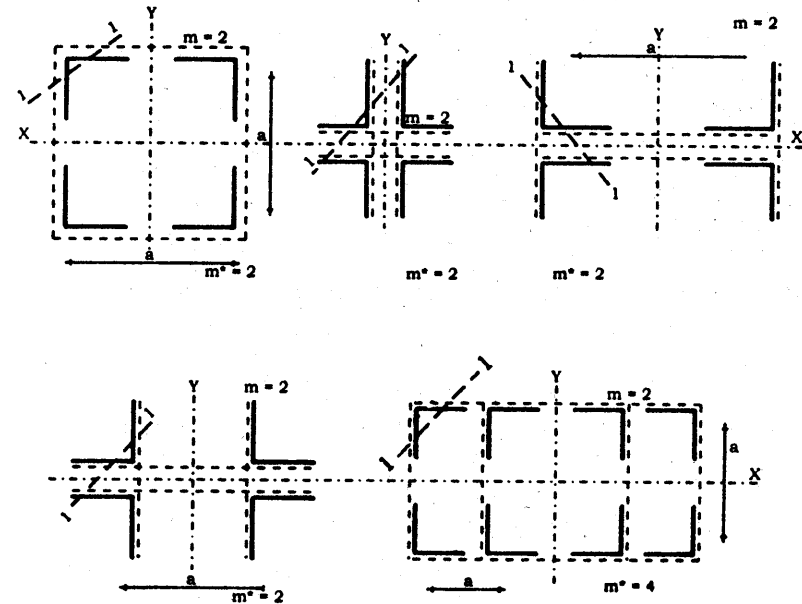
Selanjutnya gaya batang diagonal dihitung dari gaya melintang D dengan rumus sebagai berikut:

$$S = \frac{D}{n \sin \alpha}$$

di mana:

- S = gaya batang diagonal
- n = jumlah batang diagonal pada suatu potongan mendatar
- α = sudut antara batang diagonal dengan batang vertikal

Batang tersusun, di mana tidak ada sumbu bahan.
Hanya mempunyai sumbu-sumbu bebas bahan saja:



Gambar 6.9

Umumnya batang-batang tersusun yang tidak mempunyai sumbu bahan, elemen-elemennya terdiri dari baja L. Untuk menghitung kelangsingan (λ) ideal dari batang tersusun macam ini digunakan rumus-rumus sebagai berikut:

Terhadap sumbu x: $\lambda_{ix} = \sqrt{\lambda_x^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2} \geq 1,2 \lambda_1$

Terhadap sumbu y: $\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2} \geq 1,2 \lambda_1$

$$\lambda_1 \leq 50$$

di mana λ_1 dapat dihitung sebagai berikut:

* Bila plat penghubung merupakan plat kopel:

$$\lambda_1 = \frac{L_1}{i_{min}}$$

* Bila plat penghubung merupakan batang diagonal, untuk gambar 6.8a, 6.8b, 6.8c, dan 6.8d

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A L_d^3}{z A_d L_1 a^2}} \text{ dan}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A L_d^3}{z A_d L_1 a^2} + \frac{A_a}{2 A_n L_1}} \text{ untuk Gambar 6.8e}$$

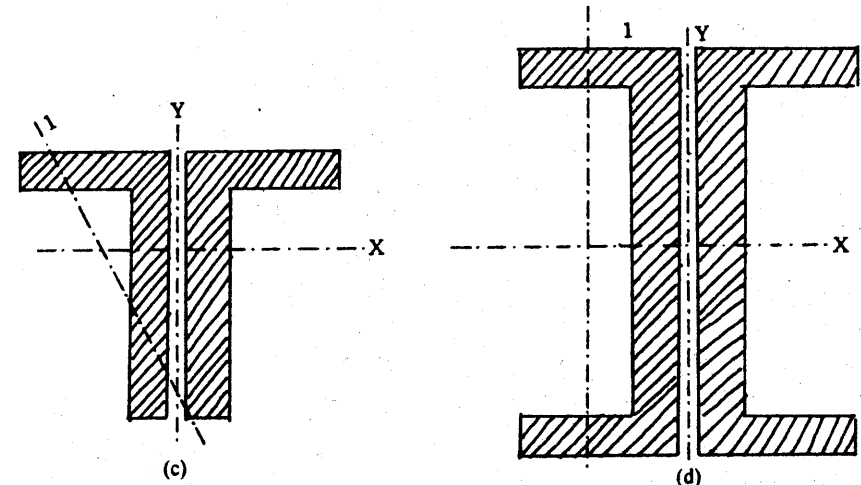
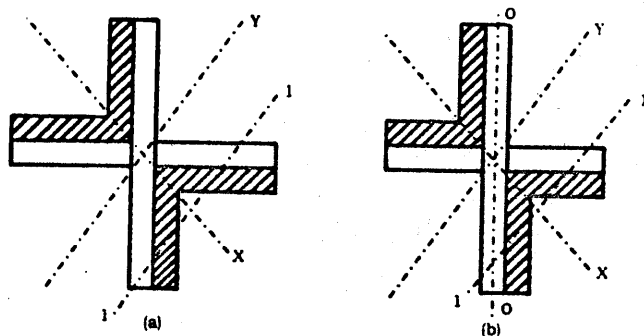
Untuk menjamin stabilitas elemen-elemen batang, harus dipenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\lambda_{ix} \geq 1,2 \lambda_1 \text{ dan } \lambda_{iy} \geq 1,2 \lambda_1$$

Pada batang tersusun yang tidak mempunyai sumbu bahan, besarnya gaya lintang yang diperhitungkan terhadap kedua arah sumbunya adalah:

$$D_x = 0,02 N \text{ dan } D_y = 0,02 N$$

Selain itu masih ada lagi batang tersusun yang jarak antarannya sama dengan plat kopel sebagai berikut:



Gambar 6.10

Pada pekerjaan rangka sering dijumpai pemakaian batang tersusun dengan pelat kopel di antaranya. Pada batang tersusun semacam ini:

- Paling sedikit dipasang 2 paku keling/baut untuk menahan puntir.
- Pelat kopel beserta alat sambungnya tidak perlu diperhitungkan karena jarak antara profil dekat sekali sehingga momen yang terjadi akibat D kecil sekali dan dapat diabaikan.
- Jika batang terdiri dari 2 baja L yang tidak sama kaki seperti Gambar 6.10b, selain dihitung i_x secara teoritis (lebih teliti) dapat juga dipakai rumus pendekatan sebagai berikut:

$$i_x = 0,87 i_o$$

di mana: i_o = jari-jari kelembaman dari penampang batang tersusun terhadap sumbu 0 - 0

- Untuk batang tersusun menurut Gambar 6.10c dan 6.10d λ_{iy} dapat diambil sama dengan λ_y

Contoh batang tersusun yang menggunakan batang diagonal sebagai penghubung:

Suatu batang tekan tersusun terdiri dari || 18 dengan jarak antarpunggung = 140 mm.

Panjang batang $L = 6,00$ m di mana ujung-ujungnya adalah sendi $L_k = L = 6,00$ m.

Batang memikul beban sentris $N = 45$ ton.

Antara kedua profil [dipakai batang penghubung diagonal] 6×60 Dipakai sistem batang diagonal tanpa batang mendatar (lihat Gambar 5.15b) sudut $\alpha = 45^\circ$, dipakai paku keling $\phi = 17$ mm.

$\bar{\sigma}_{baja} = 1600$ kg/cm²

Ditanyakan: Apakah batang tersusun tersebut cukup kuat?

Catatan:

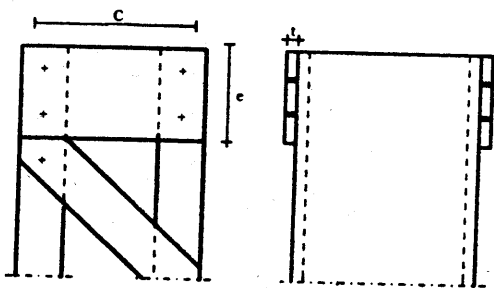
- Pada ujung-ujung batang tersusun harus dipasang pelat kopel yang cukup kuat sebagai pengikat.

Pelat kopel pada ujung-ujung ini harus memenuhi syarat sebagai berikut:

1. Tebal minimum = $1/50$ x jarak mendatar antara paku keling.
2. Panjang pelat pengikat harus lebih besar dari jarak mendatar antara paku keling. $e > c$

- Untuk menjaga kekakuan batang penghubung diagonal disyaratkan $\lambda \leq 150$

- Untuk pertimbangan keamanan, perhitungan selalu didasarkan atas gaya tekan (hanya batang diagonal tekan saja yang ditinjau, sehingga diagonal tarik akan menyesuaikan dengan batang tekan).

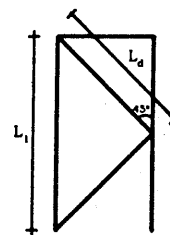


$$t_{min} = \frac{1}{50} c$$

$$e > c$$

Jawab:

Tipe seperti pada Gambar 6.8b adalah sebagai berikut:
Ditinjau terhadap sumbu bahan (sumbu x)



$$i_x = 6,95 \text{ cm} \quad A = 28 \text{ cm}^2$$

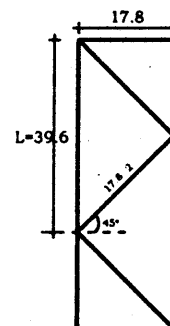
$$\lambda_x = \frac{600}{6,95} = 86,5 \rightarrow \omega_x = 1,722$$

$$\bar{N} = \frac{1600 \times 2 \times 28}{1,722} = 52033 \text{ kg}$$

$$\approx 52 \text{ ton} > 45 \text{ ton}$$

(OK)

Ditinjau terhadap sumbu bebas bahan (sumbu y)



$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2} = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} \quad \text{untuk [18: } I_y = 114 \text{ cm}^4;$$

$$A = 28 \text{ cm}^2$$

$$I_y = [114 + 28 \times (\frac{1}{2} \times 17,8)^2] \times 2$$

$$= 4663,76 \text{ cm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{4663,76}{2 \times 28}}$$

$$= 9,13 \text{ cm}$$

$$\lambda_y = \frac{600}{9,13} = 65,7$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{A L_d^3}{z A_d L_1 a^2}}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{2 \times 28 \times 25,2^2}{2 \times 0,6 \times 6 \times 35,6 \times 17,8^2}}$$

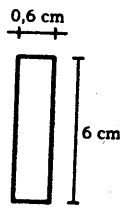
$$\lambda_1 = 10,44 < 50 \text{ (OK)}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{65,7^2 + 10,44^2} = 66,52 \rightarrow \omega_y = 1,419$$

$$\bar{N} = \frac{1600 \times 2 \times 28}{1,419} = 63143 \text{ kg} = 63,143 \text{ ton}$$

$$> 45 \text{ ton (OK)}$$

Ditinjau batang diagonal [6 x 60



$$i_{\min} = 0,289 t = 0,289 \times 0,6$$

$$\lambda = \frac{L_d}{i_{\min}} = \frac{25,2}{0,289 \times 0,6} = 145,33 < 150 \text{ (OK)}$$

$$\lambda = 145,33 \rightarrow \omega = 4,076$$

$$S = \frac{D}{n \sin \alpha}$$

$$D = 0,02 N = 0,02 \times 45$$

$n = 2$ (pada potongan mendatar ada dua diagonal yaitu setangkup)

$$\sin 45^\circ = 0,707$$

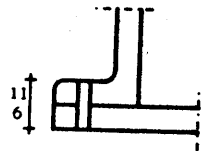
$$S = \frac{0,02 \times 45}{2 \times 0,707} = 0,635 \text{ ton}$$

$$\bar{S} = \frac{\bar{\sigma} \times l \times A}{\omega}$$

$$= \frac{1600 \times 1 \times 0,6 \times 6}{4,076} = 1413 \text{ kg} = 1,413 \text{ ton}$$

$> 0,635 \text{ ton}$ (OK)

Ditinjau kekuatan paku keling



Sambungan irisan tunggal

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi \times 1,7^2 \times 0,8 \times 1,6$$

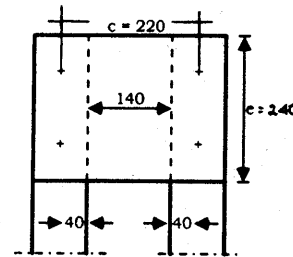
$$= 2,95 \text{ ton}$$

$$\bar{P} = 0,6 \times 1,7 \times 1,6 \times 1,6$$

$$= 2,61 \text{ (} 1,5d \leq S_1 \leq 2d \text{)}$$

$$\bar{P} = 2,61 \text{ ton} > S = 0,635 \text{ ton (OK)}$$

Ukuran pelat kopel ujung



$$t_{\min} = 1/50 c = 1/50 \times 22$$

$$= 0,44 \text{ cm}$$

dipakai $t = 5 \text{ mm}$

$e > c = 22 \text{ cm}$

dipakai $e = 24 \text{ cm}$, maka

panjang batang tinggal:

$$600 - 2 \times 24 = 552 \text{ cm}$$

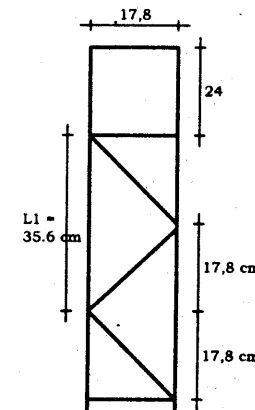
Panjang $\frac{1}{2} L_1$:

$$\frac{552}{17,8} = 31 \text{ lapangan}$$

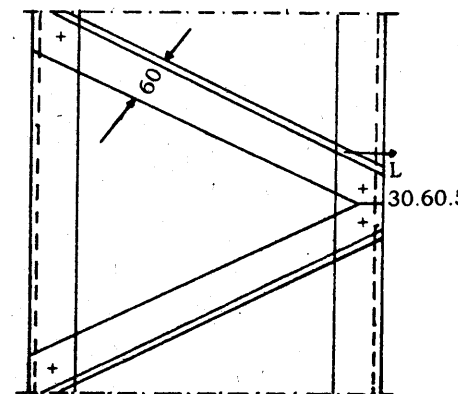
Panjang tiap lapangan

$$\frac{552}{31} = 17,8 \text{ cm}$$

Jadi $\alpha = 45^\circ$ (OK)



Kalau batang diagonal digunakan baja L 30.60.5, di mana ukuran lebar 60 mm menempel profil [agar jarak paku keling ke tepi batang diagonal memenuhi syarat sebagai berikut:



Baja L 30.60.5 mempunyai

$$A = 4,29 \text{ cm}^2$$

$$i_y = 0,78 \text{ cm} ; i_\eta = 0,63 \text{ cm}$$

$$i_x = 1,9 \text{ cm} ; i_\xi = 1,96 \text{ cm}$$

$$i_{\min} = i_\eta = 0,63 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{25,2}{0,63} = 40 \rightarrow \omega = 1,144$$

$$\bar{S} = \frac{1,6 \times 4,29}{1,144}$$

$$= 6 \text{ ton} > 0,63 \text{ ton}$$

Catatan: Di sini pemakaian baja L tidak hemat karena harus menggunakan lebar 60 mm, untuk keperluan pemasangan alat sambung.

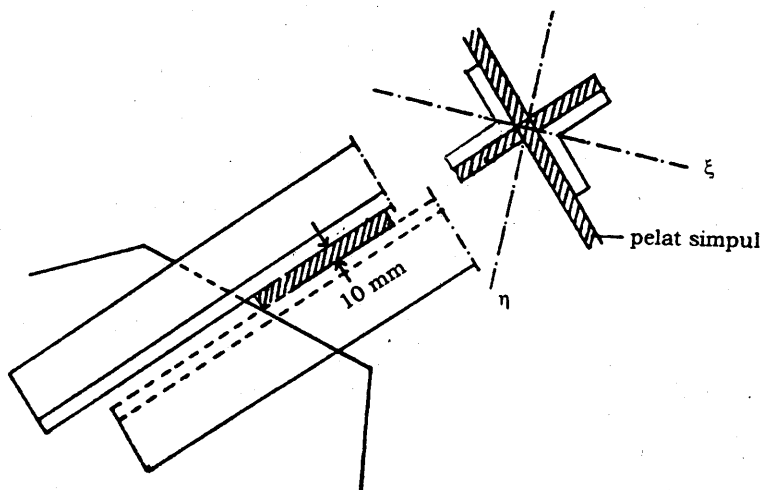
Contoh soal batang tersusun dengan pelat kopel di antaranya:

Suatu batang diagonal dari suatu rangka batang, panjang antara kedua titik simpul $L_x = L_y = 3,20$ m

Gaya tekan batang = 18 ton, $\sigma = 1600$ kg/cm²

Batang dari baja siku \angle dengan tebal pelat simpul = tebal pelat kopel = 10 mm

Jawab:



Ditinjau terhadap sumbu bahan (sumbu ξ)

$$I_{\min} = 1,5 P L_k^2 = 1,5 \times 18 \times 3,2^2 = 276 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{profil}} = \frac{276}{2} = 138 \text{ cm}^4$$

Dipilih \angle 80.80.10 yang mempunyai $I_{\xi} = 139 \text{ cm}^4 > 138 \text{ cm}^4$

L 80.80.10 mempunyai:

$$I_{\xi} = 139 \text{ cm}^4 ; I_{\eta} = 35,9 \text{ cm}^4 ; v = 3,31 \text{ cm}$$

$$A = 15,1 \text{ cm}^2 ; I_{\xi} = 3,03 \text{ cm} ; I_{\eta} = 1,54 \text{ cm}$$

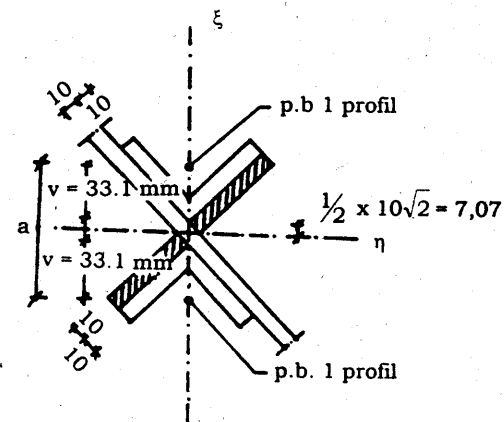
$$\lambda_{\xi} = \frac{L}{i_{\xi}} = \frac{320}{3,03} = 105,6 \rightarrow \omega_{\xi} = 2,196$$

Daya dukung batang terhadap sumbu ξ :

$$\bar{N} = \frac{\sigma z A}{\omega_{\xi}} = \frac{1,6 \times 2 \times 15,1}{2,196} = 22 \text{ ton} > 18 \text{ ton}$$

(OK)

Ditinjau terhadap sumbu bebas bahan (sumbu η)



$$a = 2 \times 33,1 + 2 \times 7,07 \\ = 80,34 \text{ mm} \approx 8 \text{ cm}$$

$$I_{\eta} = 2 [35,9 + 15,1 \times (\frac{1}{2} \times 8)^2] = 555 \text{ cm}^4$$

$$i_{\eta} = \sqrt{\frac{I_{\eta}}{2A}} = \sqrt{\frac{555}{2 \times 15,1}} = 4,29 \text{ cm}$$

(i_{η} batang tersusun)

$$\lambda_{\eta} = \frac{320}{4,29} = 74,59$$

Panjang batang dibagi menjadi 3 bagian oleh pelat kopel.

$$L_1 = \frac{320}{3} = 106,7 \text{ cm} \approx 107 \text{ cm}$$

$$\lambda_1 = \frac{107}{i_n (i_{\min})} = \frac{107}{1,54} = 69,48 > 50$$

Di sini i_n dari batang tunggal

$\lambda_1 > 50$ tidak memenuhi syarat.

Batang dibagi menjadi 5 bagian

$$L_1 = \frac{320}{5} = 64 \text{ cm}$$

$$\lambda_1 = \frac{64}{1,54} = 41,58 < 50 \text{ (OK)}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{1}{2} m \lambda_1^2}$$

$$\lambda_y = 74,59$$

$$\lambda_1 = 41,56$$

$$m = 2$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{74,59^2 + 41,56^2} = 85,38 \rightarrow \omega_{iy} = 1,711$$

$$\bar{N} = \frac{1,6 \times 2 \times 15,1}{1,711} = 28,24 \text{ ton} > 18 \text{ ton (OK)}$$

Catatan:

Di sini tampak kemampuan mendukung beban terhadap sumbu bebas bahan jauh lebih besar dari pada kemampuannya terhadap sumbu bahan.

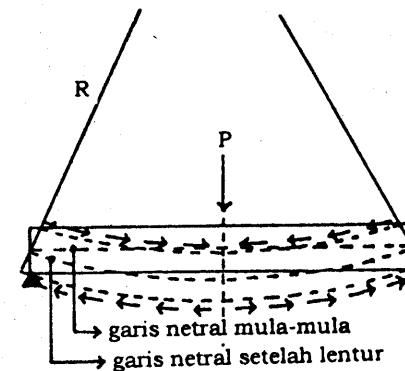
Menurut PPBBI '83 dalam kasus dua batang siku dengan pelat kopel di antaranya seperti soal di atas, cukup terhadap sumbu bahan saja yang ditinjau.

-ooOoo-

BAB VII

BALOK TERLENTUR

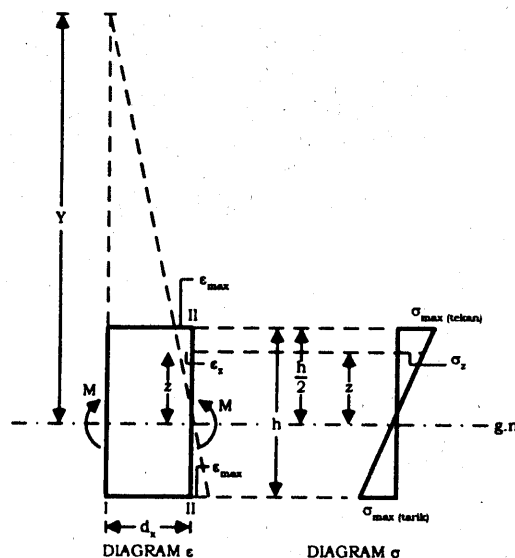
Suatu balok pada umumnya akan mentransfer beban vertikal sehingga kemudian akan terjadi lenturan. Misalnya, balok dibebani P seperti yang terlihat pada Gambar 7.1, maka balok akan melentur dengan jari-jari R yang tidak konstan. Potongan yang semula rata setelah melentur akan tetap rata.



Gambar 7.1

Bagian atas dari garis netral (g.n.) tertekan dan bagian bawah dari g.n. tertarik; sehingga pada bagian atas g.n. terjadi pemampatan dan di bawah g.n. terjadi perpanjangan (lihat Gambar 7.1).

Di situ nampak bahwa suatu balok merupakan kombinasi antara elemen yang tertekan dan elemen yang tertarik. Dalam bab ini dianggap bahwa sayap yang tertekan dari baja cukup diberi *bracing* sedemikian rupa sehingga *buckling* pada bagian yang tertekan tidak akan terjadi sampai ultimate momen kapasitasnya tercapai. Memang pada balok-balok induk (*girder*) dipasang balok-balok anak (*beam*) sehingga merupakan *lateral bracing* yang cukup sehingga stabilitasnya tidak perlu dipertimbangkan lagi, atau dipasang *bracing* yang cukup. Jadi peninjauan lentur di sini dilakukan tanpa meninjau adanya *lateral torsional buckling* dari balok. Atau disebut lentur murni.



Gambar 7.2

Ditinjau dari balok sepanjang satuan panjang dx (lihat Gambar 7.2):

- Akibat beban pada gelagar, pada setiap potongan melintang gelagar terjadi momen yang besarnya berbeda-beda. Pada

potongan I-I terjadi M , maka pada potongan II-II (berjarak dx dari potongan I-I) timbul $M + \Delta M$.

Karena ΔM kecil sekali mengingat jarak dx , selanjutnya dianggap pada potongan II-II terjadi M saja.

- Akibat timbulnya M ini, pada serat terluar bagian atas terjadi tegangan tekan maksimum (σ_{\max}) dan pada serat terluar bagian bawah terjadi tegangan tarik maksimum.
- Tegangan pada tiap-tiap titik (serat) berbanding lurus dengan jaraknya terhadap garis netral.
- Selama masih dalam keadaan elastis, tegangannya juga berbanding lurus dengan regangannya, sesuai dengan rumus $\sigma = E \cdot \epsilon$ (lihat diagram ϵ dan σ pada gambar 7.2.)

Jadi tegangan di titik (serat) yang berjarak z terhadap g.n. ialah $\sigma_z = E \cdot \epsilon_z$

Menurut ilmu tegangan (*strength of material*), tegangan yang timbul di titik yang berjarak z terhadap garis netral adalah:

$$\sigma_z = \frac{M z}{I}$$

di mana I = momen inersia terhadap garis netral.

Maka tegangan yang terbesar pada jarak z ialah yang terjauh dari garis netral, yaitu serat terluar sejauh $1/2 h$ dari garis netral:

$$\sigma_{\max} = \frac{M \times \frac{1}{2} h}{I}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I / \frac{1}{2} h}$$

$\frac{I}{\frac{1}{2} h} = W$ = momen tahanan, sehingga:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W}$$

W = momen tahanan terhadap garis netral.

M bekerja pada bidang simetri (yang melalui garis netral), yaitu bidang gambar sendiri.

Untuk keperluan perencanaan tegangan max yang terjadi dibatasi oleh tegangan ijin, sehingga:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \leq \bar{\sigma}_b$$

$\bar{\sigma}_b$ = tegangan lentur/bengkok yang diijinkan yang besarnya untuk Bj 37 ialah 1600 kg/cm².

Pada balok terlentur, selain tegangannya, juga lendutannya dibatasi oleh lendutan ijin (lendutan max yang diijinkan). Pembatasan lendutan yang terjadi pada balok ini didasarkan atas pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut:

1. Kenyamanan pemakai bangunan
2. Keselamatan
3. Keindahan
4. Psikologis
5. Perlindungan pada bagian bangunan yang lain dengan sifat bahan yang cukup kenyal.
6. Memberi dukungan yang cukup, hingga suatu alat yang dipasang pada elemen struktur tersebut dapat bekerja dengan baik.
7. Pembatasan lendutan ini tergantung juga pada struktur bangunannya, untuk keperluan apa.

Mengenai besarnya batas lendutan maksimum ini dapat dilihat di Tabel 31 PPBBI 1983.

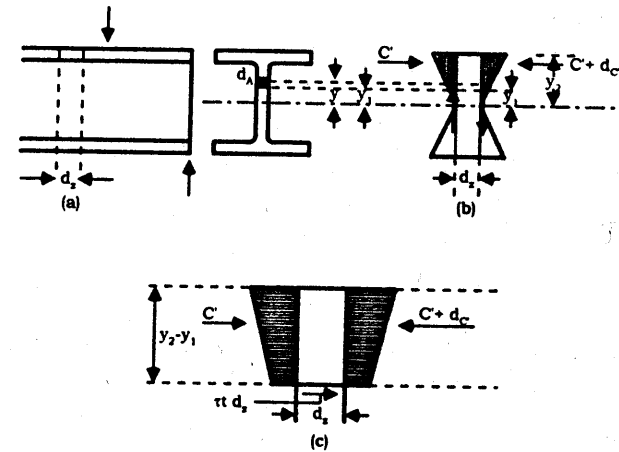
Jadi untuk mendimensi balok terlentur, harus ditinjau:

$$I. \quad \sigma_{\max} = \frac{M}{W} \leq \bar{\sigma}_b$$

$$II. \quad f_{\max} \leq \bar{f} \quad (f = \text{lendutan vertikal})$$

Selain itu akibat adanya gaya melintang akan terjadi tegangan geser.

Ditinjau persamaan tegangan geser untuk potongan yang simetri, ditinjau bagian panjang dz dari balok seperti Gambar 7. 3a



Gambar 7.3

Gambar 7.3B sebagai *free body*.

Jika satu-satuan tegangan geser τ pada suatu potongan y_1 dari garis netral yang ditinjau, maka menurut Gambar 7.3c dapat ditentukan:

$$\begin{aligned} c' + \tau t dz &= c' + dc' \\ dc' &= \tau t dz \end{aligned} \quad (1)$$

Gaya horisontal:

$$\begin{aligned} c' &= \int_{y_1}^{y_2} \sigma dA \\ c' + dc' &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma + d\sigma) dA \\ \frac{dc'}{dz} &= \int_{y_1}^{y_2} d\sigma dA \end{aligned} \quad (2)$$

Tegangan akibat momen, kita sudah tahu:

$$d\sigma = \frac{dM y}{I} \quad (3)$$

Dari persamaan (2) dan (3), diperoleh:

$$dc' = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dM y}{I} dA = \frac{dM}{I} \int_{y_1}^{y_2} y dA \quad (4)$$

Dari persamaan (1) dan (4) diperoleh:

$$\tau = \frac{dM}{dx} \left(\frac{1}{tI} \right) \int_{y_1}^{y_2} y dA$$

$$\int_{y_1}^{y_2} y dA = \text{statis momen bagian yang diarsir terhadap garis netral pada Gambar 7.3c}$$

Dari persamaan (1) dan (2) di atas menjadi:

$$\tau = \frac{dM}{dz} \left(\frac{1}{tI} \right) \times S$$

Gaya Lintang $D = \frac{dM}{dz}$, sehingga:

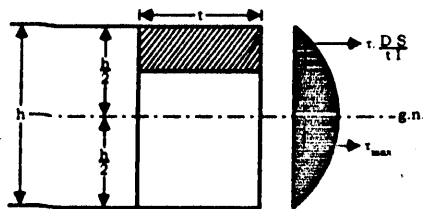
$$\tau = \frac{D S}{t I} = \tau = \text{tegangan geser}$$

Selanjutnya untuk profil I, tegangan gesernya dihitung sebagai harga rata-rata setinggi daerah badannya, sehingga:

$$\tau = \frac{D}{A_{\text{badan}}}$$

Bandingkan tegangan geser τ pada balok persegi dengan balok I.

Balok persegi panjang



$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{D S}{t I} \\ &= 1,5 \frac{D}{t h} \end{aligned}$$

Diagram tegangan geser

Balok I

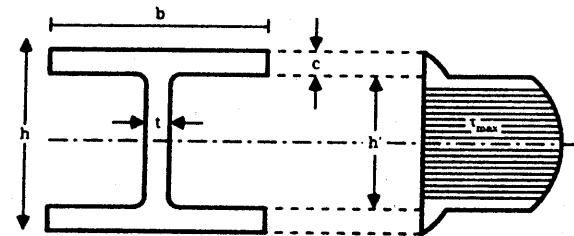


Diagram tegangan geser

Tampak sayap sangat kecil dibanding τ badan, sehingga

$$\tau = \frac{D}{A_{\text{badan}}}$$

Tegangan geser τ ini harus $\leq \tau = 0,58 \sigma$

Akhirnya untuk balok terlentur perlu ditinjau:

- I. $\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \leq \bar{\sigma}_b$
- II. $f_{\max} \leq \bar{f}$
- III. $\tau_{\max} \leq \bar{\tau} = 0,58 \bar{\sigma}_{\max}$

Umumnya:

- Balok yang panjang, lendutannya yang menentukan.
- Balok dengan panjang medium, tegangan lenturnya yang menentukan.
- Balok yang pendek, biasanya tegangan gesernya yang menentukan.

Catatan:

Untuk rumus: $\tau = \frac{D S}{t I}$

S = statis momen bagian di atas/bawah potongan yang ditinjau terhadap garis netral

D = Gaya lintang pada potongan yang ditinjau

t = Tebal profil pada potongan yang ditinjau

I = Momen Inersia seluruh penampang profil terhadap garis netral

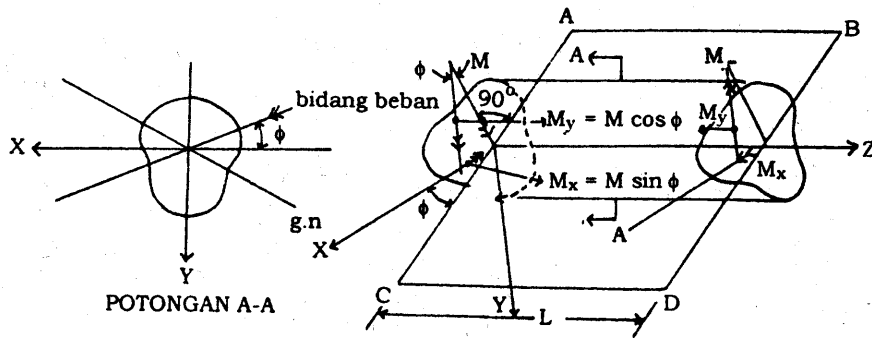
LENTUR TIDAK SIMETRIS

Rumus $\sigma = \frac{M y}{I} = \frac{M}{W}$ adalah untuk bentuk profil yang simetris

dan pembebanannya juga simetris (Artinya beban bekerja pada bidang yang simetri). Ada 2 macam keadaan lentur tidak simetris, yaitu:

1. Bebannya tidak bekerja pada bidang simetri, tetapi bentuk profilnya simetris.
2. Profilnya sendiri tidak simetris.

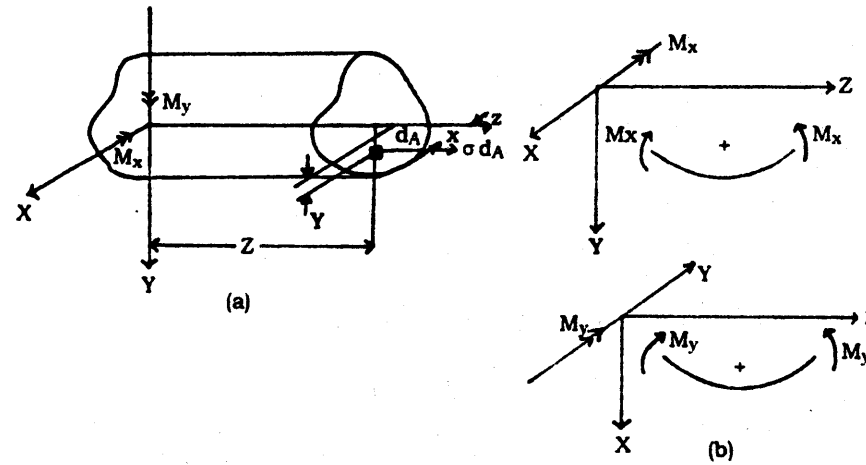
Ditinjau dari teori lentur yang umum:



Gambar 7.4

Pada Gambar 7.4 di atas, pada bidang ABCD terdapat momen murni yang timbul pada batang yang mempunyai penampang prismatis. Sudut antara bidang momen dengan bidang xz ialah ϕ . Momennya dinyatakan oleh vektor M yang \perp bidang momen ABCD.

Ditinjau bagian balok sepanjang z seperti yang tampak pada Gambar 7.5:



Gambar 7.5

Untuk memenuhi kesetimbangan freebody (Gambar 7.5a):

$$\sum F = 0, \quad \int_A \sigma dA = 0 \tag{1}$$

$$\sum M_x = 0, \quad M_x = \int_A y \sigma dA \tag{2}$$

$$\sum M_y = 0, \quad M_y = \int_A x \sigma dA \tag{3}$$

Momen-momen M_x dan M_y , keduanya adalah positif (lihat Gambar 7.5b).

Ditinjau lentur pada bidang yz saja

Jika lentur hanya terjadi pada bidang yz saja, maka tegangannya adalah proporsional dengan y, sehingga:

$$\sigma = k_1 y \tag{4}$$

Dari (1), (2), (3) dan (4) didapat:

$$k_1 \int_A y dA = 0$$

$$M_x = k_1 \int_A y^2 dA = k_1 I_x \rightarrow k_1 = \frac{M_x}{I_x} \tag{5}$$

$$M_y = k_1 \int_A xy \, dA = k_1 I_{xy} \rightarrow k_1 = \frac{M_y}{I_{xy}} \quad (6)$$

Dengan $\int_A y \, dA = 0$ berarti $y = 0$ maka x adalah *centroidal axis*. Tegangannya dapat dinyatakan sebagai berikut. Dari persamaan (4), (5) dan (6) didapat:

$$\sigma = \frac{M_x y}{I_x} \quad \text{atau} \quad \sigma = \frac{M_y y}{I_{xy}}$$

Sudut ϕ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{tg } \phi = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_x}{I_{xy}} \quad (\text{lihat Gambar 7.4}) \quad (7)$$

Dari sini tampak bahwa bila hanya ada satu sumbu simetri, (di mana $\int_A xy \, dA = I_{xy} = 0$), maka $\text{tg } \phi = \infty$ dan $\phi = 90^\circ$, ini berarti bahwa beban dan momen lenturnya terletak pada satu bidang yz .

Kesimpulan:

Jika $I_{xy} = 0$ maka momen lenturnya terletak pada bidang beban. Pada semua bentuk tidak simetris, bidang beban dan bidang momen adalah berlainan.

Ditinjau lentur pada bidang xz saja

Jika lentur terjadi pada bidang xz , tegangannya adalah proporsional dengan x , sehingga:

$\sigma = k_2 x$, maka persamaan (1) menjadi

$$k_2 \int_A x \, dA = 0, \text{ maka } x = 0$$

Ini berarti y adalah *centroidal axis*.

Persamaan (2) dan (3) menjadi:

$$M_x = k_2 \int_A xy \, dA = k_2 I_{xy}$$

$$M_y = k_2 \int_A x^2 \, dA = k_2 I_y$$

Dari persamaan (7) menjadi:

$$\text{tg } \phi = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_{xy}}{I_y}$$

Jika $I_{xy} = 0$, $\text{tg } \phi = 0$, maka beban dan momen lentur terjadi pada bidang xz .

Ditinjau lentur baik pada bidang xz maupun pada bidang yz

Keadaan ini adalah realistis pada peninjauan potongan yang tidak simetris dalam lenturan. Selama bahan masih dalam keadaan elastis, tegangan total adalah sama dengan jumlah tegangan yang ditinjau pada bidang xz dan yz , sehingga:

$$\sigma = k_1 y + k_2 x \quad (8)$$

$$M_x = k_1 I_x + k_2 I_{xy} \quad (9)$$

$$M_y = k_1 I_{xy} + k_2 I_y \quad (10)$$

Dari persamaan (6), (7), (8) ini diperoleh:

$$\sigma = \frac{M_x I_y - M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} y + \frac{M_y I_x - M_x I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} x \quad (11)$$

Rumus (11) ini merupakan persamaan lentur yang umum. Rumus ini berlaku pada keadaan sebagai berikut:

- Balok yang digunakan adalah balok lurus.
- Penampang balok adalah tetap (prismatis)
- x dan y adalah *centroidal axis*.
- Tegangannya adalah proporsional (berbanding lurus) dengan regangannya dan harga maksimumnya berada dalam batas proporsional.

Principal Axes (Sumbu Utama)

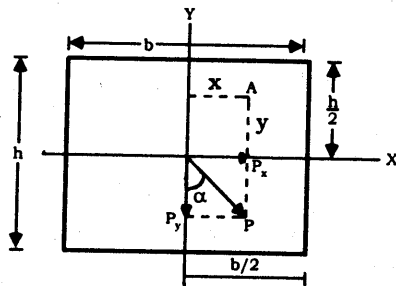
Principal Axes adalah centroidal axes yang saling tegak lurus di mana momen inersianya adalah maksimum atau minimum. Selain itu, sumbu-sumbu ini akan saling tegak lurus bila $I_{xy} = 0$. Bila potongan mempunyai sebuah sumbu simetris, sumbu tersebut adalah principal axes dan persamaan (11) menjadi:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x \quad (12)$$

Contoh pemakaian rumus (11) dan (12)

Rumus (12): $\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x$, dapat dipakai pada keadaan mi-

salnya, penampang simetri tetapi beban tidak pada sumbu simetri melainkan bersudut α terhadap sumbu simetri sebagai berikut:



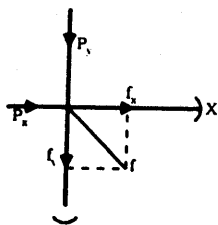
Suatu penampang balok berlentur persegi ini, dibebani P bersudut α terhadap sumbu y. Misalnya akan dicari tegangan di titik A. P diuraikan kepada sumbu x dan y menjadi P_x dan P_y .

Karena P_y timbul $\sigma_1 = \frac{M_x}{I_x} y$

Karena P_x timbul $\sigma_2 = \frac{M_y}{I_y} x$

$$\sigma_A = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_y} x$$

Lendutan dapat dicari dengan cara sebagai berikut:



Akibat P_y terjadi lendutan f_y
Akibat P_x terjadi lendutan f_x

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Catatan:

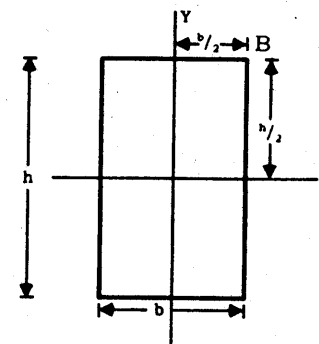
Untuk tegangan dapat dijumlahkan secara aljabar:

$$\sigma_A = \sigma_1 + \sigma_2$$

Untuk lendutan dikerjakan secara vektoris:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$$

Untuk keperluan desain selalu diambil keadaan yang paling berbahaya. Jadi kita harus mencari titik mana akan terjadi σ_{max} .



Keadaan yang paling ekstrim ialah titik B yang mana mempunyai koordinat terbesar B ($1/2b$, $1/2h$).

Harga-harga $x = 1/2b$ dan $y = 1/2h$ dimasukkan dalam persamaan (12) menjadi:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} 1/2h + \frac{M_y}{I_y} 1/2b$$

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x / 1/2h} + \frac{M_y}{I_y / 1/2b}$$

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y}$$

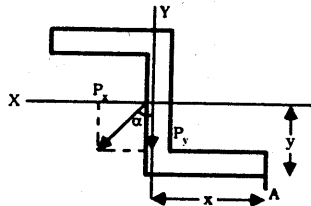
W_x = momen tahanan terhadap sumbu x

W_y = momen tahanan terhadap sumbu y

Rumus (11):

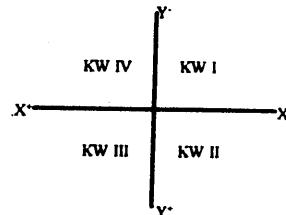
$$\sigma = \frac{M_x I_y - M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} y + \frac{M_y I_x - M_x I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} x$$

Rumus ini sebenarnya merupakan rumus umum. Untuk penampang yang tidak mempunyai sumbu simetris dapat dipakai rumus ini. Misalnya balok dibebani P bersudut α terhadap sumbu y.

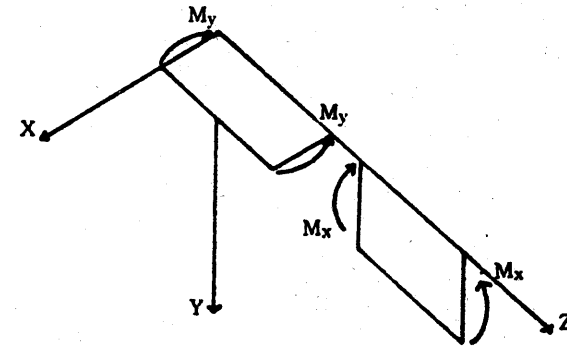


Akibat P_y timbul M_x
 Akibat P_x timbul M_y

Tegangan di titik A(x,y) dapat dicari dengan memasukkan harga-harga M_x , M_y , x dan y pada persamaan (11). Berdasarkan analisis lentur tidak simetris, luasan dA yang ditinjau adalah di bawah bidang xz dan di depan bidang zy (lihat Gambar 7.5a) dan proyeksi dA di bidang xy. Ini berarti di kuadran III dari koordinat xy. Sumbu x dan y adalah positif sebagai berikut:

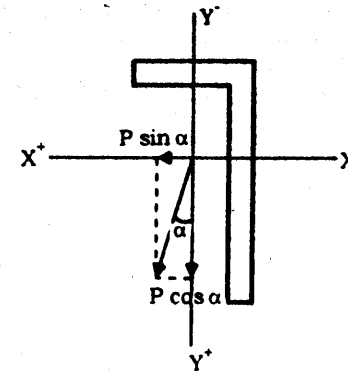


Tanda M positif dapat dilihat pada Gambar 7.5b. Jelasnya lihat gambar di bawah ini. Arah M_y dan M_x positif seperti gambar berikut ini.

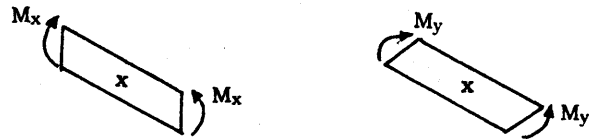
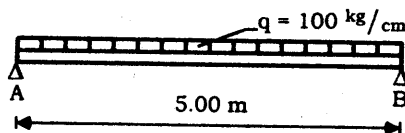


Momen lentur M positif

Contoh:



- Lihat tanda koordinat.
- Terhadap sumbu x bekerja gaya $P \cos \alpha$. (lihat gambar pada hal 120)
 Akibat $P \cos \alpha$ timbul M_x bertanda +.
- Terhadap sumbu y bekerja gaya $P \sin \alpha$.
 Akibat $P \sin \alpha$ timbul M_y bertanda + (lihat gambar pada halaman 120)

**Contoh 1:**

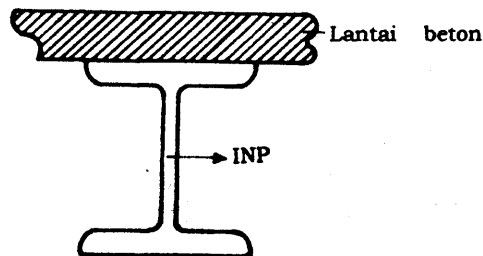
Suatu balok INP dengan panjang bentang $L = 5,00$ m sebagai *simple supported beam*, memikul beban lantai dari beton bertulang berat $q' = 650$ kg/m', dan beban hidup $q'' = 350$ kg/m', sehingga beban yang dipikul oleh balok INP $q = 350 + 650 = 1000$ kg/m'.

Hubungan antara lantai beton dan balok INP bukan sebagai komposit. $\bar{\sigma}$ baja = 1600 kg/cm'.

Ditanyakan: Tentukan nomor profil INP yang dipakai

Jawab:

Di sini flange bagian atas dari INP yang tertekan, diikat oleh pelat beton seperti gambar di bawah ini, sehingga pengaruh *lateral torsional buckling* ditahan oleh beton. Oleh sebab itu balok INP dapat dianggap memikul beban lentur murni (balok yang ditahan oleh *lateral support*).



Untuk balok terlentur tidak ada rumus taksiran. Jadi harus diperkirakan sendiri.

Dalam daftar baja tertera berat INP antara $5,95$ kg/m' sampai 199 kg/m'. Ditaksir berat INP berada di antara harga tersebut. Misal berat profil ± 40 kg/m'

$$\begin{aligned} \text{Berat beban} & q = 1000 \text{ kg/m}' \\ \text{Berat INP} & = 40 \text{ kg/m}' \end{aligned}$$

$$qt = 1040 \text{ kg/m}'$$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{1}{8} q l^2 = \frac{1}{8} \times 1000 \times 5^2 = 3250 \text{ kgm} \\ &= 325000 \text{ kg cm} \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma}_b = \frac{M_{\max}}{W_x}$$

$$W_x = \frac{M_{\max}}{\bar{\sigma}_b} = \frac{325000}{1600} = 203 \text{ cm}^3$$

Dicari di daftar baja INP yang mempunyai W_x sedikit di atas 203 cm³, yaitu INP 20 mempunyai $W_x = 214$ cm³ dan beratnya $33,5$ kg/m' < 40 kg/m' (seperti yang ditaksir).

Cek kembali:

$$\begin{aligned} q &= 1000 \text{ kg/m}' \\ \text{Berat balok} &= 33,5 \text{ kg/m}' \\ qt &= 1034 \text{ kg/m}' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{1}{8} \times 1034 \times 5^2 = 3231,25 \text{ kgm} \\ &= 323125 \text{ kg cm (di tengah bentang)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{323125}{214} = 1510 \text{ kg/cm}^2 \\ &< 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Kontrol terhadap lendutan:

Berdasarkan Tabel 31 PPBBI '83, lendutan maksimum untuk balok-balok pendukung lantai bangunan umum dan perumahan:

$$\bar{f} = \frac{L}{360}$$

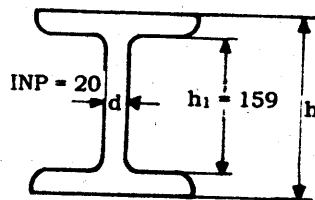
Beban hidup yang dipikul $q'' = 350 \text{ kg/m}'$

$$\left. \begin{aligned} f_{\max} &= \frac{5 q'' L^4}{384 E I_x} \\ \bar{f} &= \frac{L}{360} \end{aligned} \right\} f_{\max} = \bar{f} \rightarrow \frac{L}{360} = \frac{5 q'' L^4}{384 E I_x}$$

$$q'' = 350 \text{ kg/m}' = 3,5 \text{ kg/cm}'$$

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{5 \cdot 360 q'' L^3}{384 E} \\ &= \frac{5 \times 360 \times 3,5 \times 5^3 \times 100^3}{384 \times 2,1 \times 10^6} \\ &= 977 \text{ cm}^4 < I_x \text{ profil INP 20} = 2140 \text{ cm}^4 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Cek tegangan geser:



INP 20 mempunyai $h_1 = 159 \text{ mm}$ dan $d = 7,5 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} D_{\max} &= R_A = R_B = \frac{1}{2} q_t L \\ &= \frac{1}{2} \times 1034 \times 5 = 2585 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{D_{\max}}{d h'} \\ &= \frac{2585}{0,7 \times 15,9} = 217 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\tau} = 0,58 \bar{\sigma} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 0,58 \times 1600 \\ &= 928 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Tampak bahwa τ_{\max} jauh sekali dibanding dengan $\bar{\tau}$.

($\bar{\tau} \approx 4 \tau_{\max}$) tetapi σ_{\max} mendekati $\bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2$

Umumnya meninjau lendutan menurut PPBBI halaman 127 masih

harus ditinjau lendutan $\max = \frac{L}{250}$ akibat beban mati dan hidup.

Kontrol lendutan akibat beban mati dan hidup:

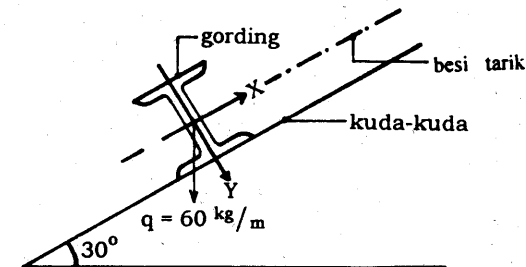
$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{L}{250} \\ f_{\max} &= \frac{5 q_t L^4}{384 E I_x} \end{aligned} \right\} f_{\max} = \bar{f} \rightarrow \frac{L}{250} = \frac{5 q_t L^4}{384 E I_x}$$

$$I_x = \frac{5 \times 250 q_t L^3}{384 E}$$

$$q_t = 1034 \text{ kg/m}' = 10,34 \text{ kg/cm}$$

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{5 \times 250 \times 10,34 \times 5^3 \times 100^3}{384 \times 2,1 \times 10^6} \\ &= 2003 \text{ cm}^4 < I \text{ profil INP 20} = 2140 \text{ cm}^4 \quad (\text{OK}) \end{aligned}$$

Contoh 2:



Suatu gelagar I berfungsi sebagai gording, terletak pada kuda-kuda sebagai tumpuan yang membentuk sudut 30° terhadap garis horisontal. Di atas gording diikat atap, misalnya dari seng atau aluminium. Di sini atap dianggap sebagai lateral support sehingga balok dianggap mengalami lentur murni. Jarak antara kuda-kuda $L = 4,00 \text{ m}$, $\bar{\sigma}_{\text{baja}} = 1600 \text{ kg/cm}^2$.

Biasanya pada jarak antara kuda-kuda, pada gording diberi baja-tarik yang membagi panjang gording antara kuda-kuda menjadi 3 bagian sama besar. Jadi panjang $L_x = 4,00 \text{ m}$ dan panjang

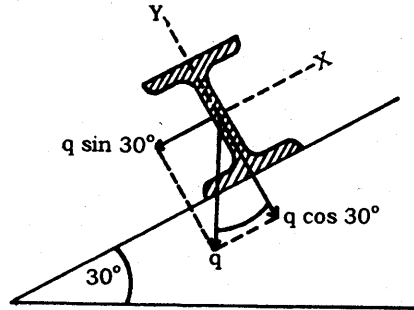
$$L_y = \frac{1}{3} L = 1,33 \text{ m}.$$

Berat atap = $12 \text{ kg/m}'$. Beban hidup yang dipikul atap = 48 kg/m . Berat $q = 60 \text{ kg/m}'$ belum termasuk berat gording. Yang ditanya-

kan Gording dianggap sebagai simple supported pada kedua perletakan kuda-kuda.

Ditanyakan: Tentukan nomor profil

Jawab:



Beban q diuraikan dulu terhadap sumbu x dan sumbu y , sehingga terdapat sumbu x sebagai garis netral, bekerja beban $q_x = q \cos 30^\circ$ dan pada sumbu y bekerja beban $q_y = q \sin 30^\circ$. Karena profil apa yang dipakai tidak ditentukan, maka dapat dicoba untuk menggunakan profil INP. Dalam daftar baja untuk INP, perbandingan antara W_y dan $W_x \approx 1/8$.

$$\frac{W_y}{W_x} = \frac{1}{8} \rightarrow W_y = \frac{W_x}{8} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \quad (2)$$

(1) dan (2):

$$\bar{\sigma}_b = \frac{M_x}{W_x} + \frac{8 M_y}{W_x} \rightarrow W_x = \frac{8 M_y + M_x}{\bar{\sigma}_b}$$

$$M_x = \frac{1}{8} q \cos 30^\circ L^2 = \frac{1}{8} \times 60 \times 0,866 \times 4^4 = 103,92 \text{ kgm} = 10392 \text{ kg cm}$$

$$M_y = \frac{1}{8} q \sin 30^\circ \left(\frac{1}{3} L\right)^2 = \frac{1}{8} \times 60 \times 0,5 \times (4/3)^2 = 6,67 \text{ kgm} = 667 \text{ kg cm}$$

$$W_x = \frac{8 \times 667 + 10392}{1600} = 9,83 \text{ cm}^3$$

Dipakai INP terkecil ialah INP 8 mempunyai $W_x = 19,5 \text{ cm}^3$ dan berat sendiri INP 8 = $5,95 \text{ kg/m} \approx 6 \text{ kg/m}$ $q_{\text{total}} = 60 + 6 = 66 \text{ kg/m}$.

$$M_x = \frac{1}{8} \times 66 \times 0,866 \times 4^2 = 114,31 \text{ kgm} = 11431 \text{ kg cm}$$

$$M_y = \frac{1}{8} \times 66 \times 0,5 \times (4/3)^2 = 7,33 \text{ kgm} = 733 \text{ kg cm}$$

$$W_x = \frac{8 \times 733 + 11431}{1600} = 10,81 \text{ cm}^3$$

$$< W_x \text{ INP 8} = 19,5 \text{ cm}^3 \text{ (OK)}$$

Kontrol lendutan:

Menurut PPBBI '83, untuk balok-balok miring, pedoman batas lendutan berlaku untuk tegak lurus sumbu kuat (sumbu x), kecuali bila ada ketentuan lain.

$$\bar{f} = \frac{L}{180} = \frac{400}{180} = 2,22 \text{ cm (untuk beban hidup saja)}$$

Beban hidup = 48 kg/m

Jadi:

$$f_x = \frac{5}{384} \times \frac{0,48 \cos 30^\circ L_x^4}{E I_x}$$

$$= \frac{5 \times 0,48 \times 0,866 \times 4^4 \times 100^4}{384 \times 2,1 \times 10^6 \times 77,8} = 0,85 \text{ cm}$$

$$< \bar{f} = 2,22 \text{ cm}$$

Kontrol untuk beban hidup + mati: $q_t = 66 \text{ kg/m}'$

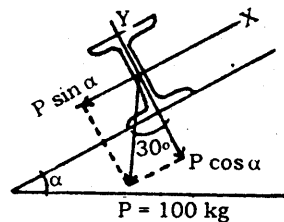
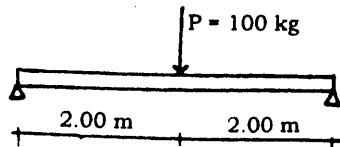
$$f_x = \frac{5 \times 0,66 \times 0,866 \times 4^4 \times 100^4}{384 \times 2,1 \times 10^6 \times 77,8} = 1,06 \text{ cm}$$

$$< \bar{f} = \frac{400}{250} = 1,6 \text{ cm} \quad (\text{OK})$$

Tegangan geser hanya ditinjau bila bebannya besar dan bentangnya pendek. Jadi di sini tidak perlu meninjau tegangan gesernya.

Untuk balok-balok gording selanjutnya tidak perlu untuk meninjau tegangan gesernya. Menurut PPBBI halaman 127, untuk gording ada persyaratan sebagai berikut:

Kekakuan dalam arah sejajar bidang atap haruslah sedemikian rupa, sehingga akibat beban vertikal $P = 100 \text{ kg}$ di tengah-tengah bentangnya, lendutan maksimum dalam arah sejajar bidang atap $\leq 25 \text{ mm}$.



$$\text{Akibat } P \cos 30^\circ \text{ terjadi } f_x = \frac{P \cos 30^\circ L^3}{48 E I}$$

$$\text{Akibat } P \sin 30^\circ \text{ terjadi } f_y = \frac{P \sin 30^\circ (L/3)^3}{48 E I_y}$$

$$f_x = \frac{100 \times 0,5 \times (4/3)^3 \times 100^3}{48 \times 2,1 \times 10^6 \times 6,29} = 0,187 \text{ cm}$$

$$< 2,5 \text{ cm} \quad (\text{OK})$$

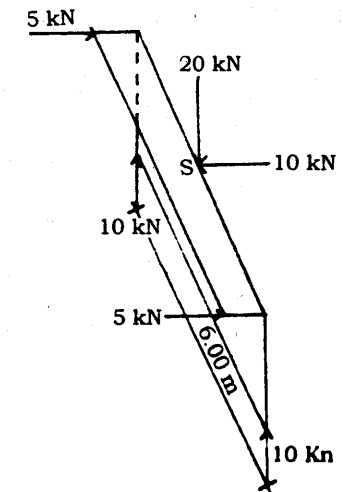
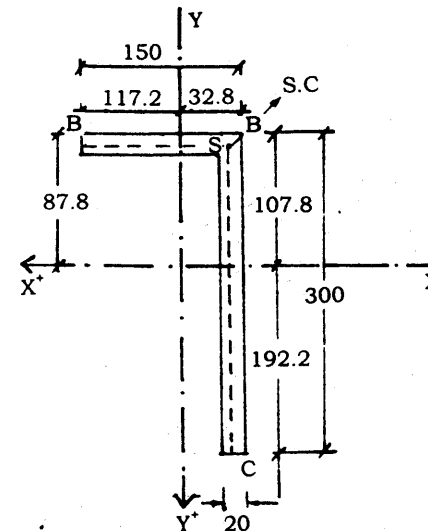
Contoh Soal Balok Terlentur dengan Batang yang Tidak Sime-tri

Suatu balok dengan bentang $L = 6,00 \text{ m}$ sebagai simple supported beam dari baja L150 x 300 x 20.

Beban di tengah-tengah bentang terhadap sumbu x $P_x = 20 \text{ kN}$ dan terhadap sumbu y $P_y = 10 \text{ kN}$ (arah ke kiri) Baja dari Bj 37, $\sigma = 1600 \text{ kg/cm}^2$

Hitunglah berapa tegangan yang terjadi di titik-titik A, B dan C seperti tergambar. (Berat profil itu sendiri diabaikan).

Jawab:



Catatan: Agar tidak terjadi puntir pada balok, beban harus melalui *shear centre* (s.c.). S adalah s.c. dari baja L.

Akibat beban 20 kN, terjadi momen positif

$$M_x = \frac{1}{4} \times 20 \times 6 = 30 \text{ kNm}$$

Akibat beban 10 kN, terjadi momen positif

$$M_y = \frac{1}{4} \times 10 \times 6 = 15 \text{ kNm}$$

Dari profil L150 x 300 x 20 dapat dicari besarnya I_x , I_y dan I_{xy} .

$$I_x = 80,44 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad I_{xy} = -19,17 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 14,02 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$M_x = 30 \text{ kNm} = 30 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_y = 15 \text{ kNm} = 15 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Titik B (117,2 ; -87,8). persamaan

$$\sigma = \frac{M_x I_y - M_y I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} y + \frac{M_y I_x - M_x I_{xy}}{I_x I_y - I_{xy}^2} x$$

$$\sigma_B = \frac{30 \times 14,02 - 15 \times (-19,17)}{80,44 \times 14,02 - (-19,17)^2} (-87,8) +$$

$$\frac{15 \times 80,44 - 30 \times (-19,17)}{80,44 \times 14,02 - (-19,17)^2} 117,2$$

$$= \frac{420,6 + 287,55}{1127,7688 - 367,4889} (-87,8) + \frac{1206,6 + 575,1}{1127,7688 - 367,4889} 117,2$$

$$\sigma_B = \frac{708,15}{760,3} (-87,8) + \frac{1781,7}{760,3} 117,2$$

$$= 0,93 \times (-87,8) + 2,34 \times 117,2$$

$$= -81,654 + 274,248 = +192,6 \text{ N / mm}^2 \text{ (tarik)}$$

Titik A (-32,8 ; -107,8)

$$\sigma_A = 0,93 \times (-107,8) + 2,34 \times (-32,8)$$

$$= -100,254 - 76,752 = -177 \text{ N / mm}^2 \text{ (tekan)}$$

Titik C (-32,8 ; +192,2)

$$\sigma_C = 0,93 \times 192,2 + 2,34 \times (-32,8)$$

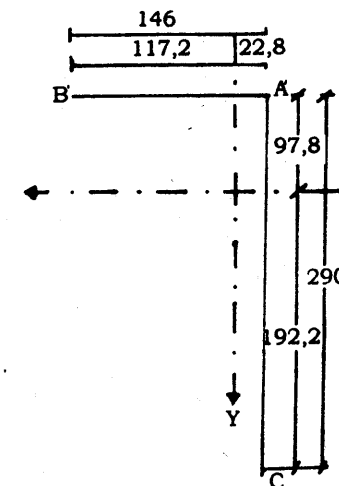
$$= 178,746 - 76,752 = +102 \text{ N / mm}^2 \text{ (tarik)}$$

Untuk mencari besarnya tegangan geser maksimum, dapat dilakukan dengan mencari garis netral. Pada profil simetris diketahui tegangan geser maksimum berada pada garis netral. Demikian juga pada *Thin Walled Open Sections*, misalnya baja L tegangan

geser maksimumnya berada di tempat perpotongan garis netral dan penampang profil.

Mencari garis netral:

Untuk mencari garis netral ialah dari profil L digambar garis tengah dari kaki mendatar dan garis tengah dari kaki vertikal sebagai berikut:



A (-22,8; -97,8)

$$\sigma_A = 0,93 \times (-97,8) + 2,34 \times (-22,8)$$

$$= -90,954 - 53,352 = -144,3 \text{ N / mm}^2 \text{ (tekan)}$$

B' (-117,2; -97,8)

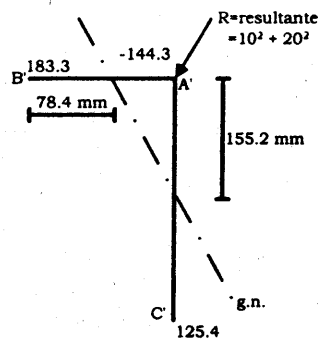
$$\sigma_{B'} = 0,93 \times (-97,8) + 2,34 \times 117,2$$

$$= -90,954 + 274,248 = 183,3 \text{ N / mm}^2 \text{ (tarik)}$$

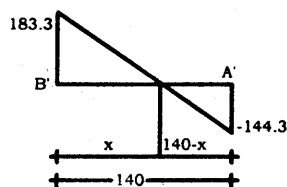
C' (-22,8; 192,2)

$$\sigma_{C'} = 0,93 \times 192,2 + 2,34 \times (-22,8)$$

$$= 178,746 - 53,352 = 125,4 \text{ N / mm}^2 \text{ (tarik)}$$



Untuk mencari perpotongan garis netral dengan A'B' adalah:



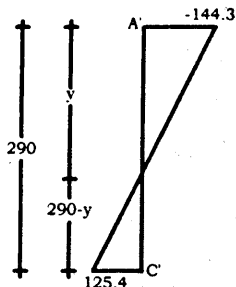
$$\frac{x}{140 - x} = \frac{183,3}{144,3}$$

$$144,3 x = 183,3 (140 - x)$$

$$144,3 x + 183,3 x = 183,3 \times 140$$

$$x = \frac{183,3 \times 140}{(144,3 + 183,3)} = \frac{183,3 \times 140}{327,6} = 78,4 \text{ mm}$$

Untuk mencari perpotongan garis netral dengan A'C' adalah:



$$\frac{y}{290 - y} = \frac{144,3}{125,4}$$

$$125,4 y = 144,3 (290 - y)$$

$$125,4 y + 144,3 y = 144,3 \times 290$$

$$y = \frac{144,3 \times 290}{(125,4 + 144,3)} = 155,2 \text{ mm}$$

Dengan diketahuinya letak dari garis netral:

- Dapat dikontrol tanda + dan - (tarik dan tekan); berdasarkan beban R di atas atau di bawah g.n. Di atas g.n. adalah tekan. Jadi di A' harus negatif. Di bawah g.n. adalah tarik. Jadi di B' dan C' harus positif.
- Dapat menentukan tegangan geser maksimum. Pada profil simetris λ_{max} ada di garis netral. Demikian juga pada profil tidak simetris, λ_{max} berada pada perpotongan antara g.n. dengan profil. Pada kaki horisontal λ_{max} berada di titik 78,4 mm dari B' dan pada kaki vertikal λ_{max} berada di titik 155,2 mm dari A'.

Untuk memperoleh besarnya tegangan geser (= fq.s), harus dicari lebih dahulu besarnya *shear flow* (qs), di mana fq.s atau sama dengan shear flow (qs) dibagi tebal pada perpotongan g.n. dengan garis-garis tengah profil (B'A'C').

Rumus tegangan geser bagi penampang yang simetri ialah:

$$\tau = \frac{D S}{t I} (= fq_s = \frac{Q S}{t I} \text{ dimana } S = A x y_c$$

Gambar 7.6a menunjukkan suatu balok yang sangat pendek. Pada titik S di badan, tegangan geser pada bagian vertikal dan longitudinal adalah komplementer dan diberikan oleh rumus:

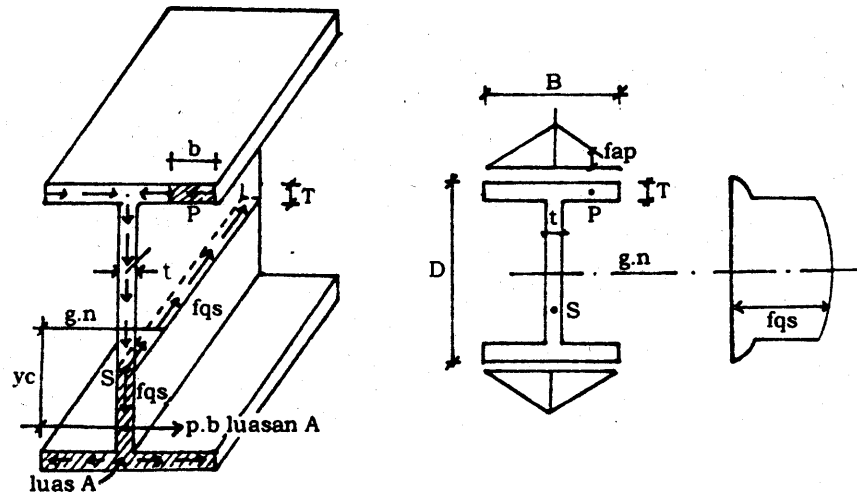
$$fq_s = \frac{Q A Y_c}{(I t_s)}$$

di mana:

Q = gaya geser vertikal pada penampang

A = Luas yang diarsir, bagian dari penampang antara S dan serat terluar.

- Y_c = Jarak antara pusat berat luas A ke garis netral.
 I = Momen inersia dari seluruh luas penampang terhadap garis netral.
 t_s = Tebal dari potongan pada titik S.
 f_{qs} = Tegangan geser di titik S (s)



(a) Shear flow

(b) Distribusi tegangan

Gambar 7.6

Rumus tersebut di atas tidak dapat dipakai untuk memperoleh tegangan geser vertikal di sayap yang menjorok. Kenyataannya, penahanan dari penampang terhadap geser vertikal hampir seluruhnya diterima oleh badan. Resultante dari tegangan geser longitudinal di badan adalah setimbang dengan perubahan ke dalam gaya tarik normal pada luasan A yang tergantung dari momen lentur yang bervariasi sepanjang balok.

Sama dengan tegangan longitudinal di sayap-sayap dan memberikan peningkatan tegangan geser yang komplementer yang tampak pada arah yang ditunjukkan. Misalnya, pada titik P di sayap atas:

$$A = b T, \quad t_s = T, \quad Y_c = (D - T)/2$$

maka persamaan $f_{qs} = \frac{Q A Y_c}{(I t_s)}$ menjadi: $f_{qp} = \frac{Q b(D - T)}{2 I}$

Persamaan ini adalah linier dengan b sebagai variabel. Dengan menentukan besarnya $b = B/2$ maka diperoleh besarnya f_{qp} max sebagai berikut:

$$f_{qp \max} = Q B (D - T)/4I$$

Distribusi tegangan geser seluruhnya dapat dilihat pada Gambar 7.6b.

Shear Flow

Persamaan $f_{qs} = \frac{Q A Y_c}{(I t_s)}$ bila dikalikan dengan tebalpotongan (t) disebut *shear flow*. Rumus shear flow di titik S ialah $q_s = t \times f_{qs}$,

maka rumus shear flow di S menjadi:

$$q_s = \frac{Q A Y_c}{I}$$

Tegangan pada Thin Walled Open Sections

Penampang-penampang baja biasanya tersusun dari elemen-elemen yang relatif tipis, di mana analisisnya dapat disederhanakan:

- Oleh penunjukan semua dimensi dari bentuk penampang.
- Oleh anggapan bahwa tegangan geser tidak berubah-ubah melintang tebalnya.
- Oleh pengabaian setiap tegangan geser yang bekerja tegak lurus pada penampang profil. Jika ini sama dengan nol pada setiap permukaan luar, maka harus amat kecil di dalam suatu *thin walled section*.

Bila lebih lanjut dianggap bahwa beban dipakai dengan cara sedemikian rupa sehingga tidak terjadi puntir pada balok, shear flow pada suatu titik S pada penampang profil diberikan oleh persamaan berikut:

$$q_s = q_0 - (Q_{ey} / I_x) \int_0^s t_y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t_x ds$$

dimana Q_{ex} dan Q_{ey} adalah efektif shear forces.

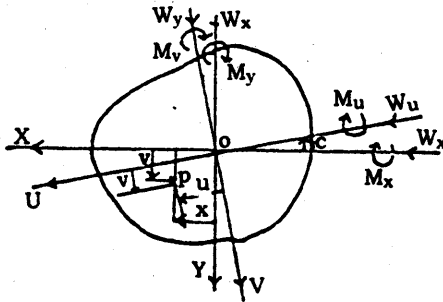
Untuk mencari Q_{ex} dan Q_{ey} ditinjau dengan teori Megson adalah sebagai berikut:

Pada profil tidak simetris seperti baja L dalam tabel diketahui selain ada sumbu x dan sumbu y ada pula sumbu u (sumbu ξ) dan sumbu v (sumbu η) sebagai sumbu utama (principal axis).

Ditinjau suatu penampang sembarang seperti gambar berikut:

$$\begin{aligned} u &= x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ v &= y \cos \alpha - x \sin \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_u &= M_x \cos \alpha - M_y \sin \alpha \\ M_v &= M_y \cos \alpha - M_x \sin \alpha \end{aligned}$$



$$I_u = I_x \cos^2 \alpha + I_y \sin^2 \alpha - I_{xy} \sin 2\alpha$$

$$I_v = I_x \sin^2 \alpha + I_y \cos^2 \alpha + I_{xy} \sin 2\alpha$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = 2 I_{xy} / (I_y - I_x)$$

α adalah berlawanan arah jarum jam (lihat gambar).

Bila hasil α negatif, arah α adalah searah dengan jarum-jam.

Untuk lentur pada profil simetris diketahui:

$$f = M_x y / I_x + M_y x / I_y$$

f adalah tegangan lentur (σ)

Untuk lentur pada profil tidak simetris dipakai rumus:

$$f = M_u v / I_u + M_v u / I_v$$

Jika hasil tegangannya adalah positif, berarti tarik. Pemakaian sumbu utama dapat dihindari dengan menggunakan momen lentur efektif. Ini adalah momen modifikasi yang dapat ditentukan untuk bekerja terhadap sumbu x dan sumbu y . Dengan demikian persamaannya menjadi:

$$f = M_{ex} y / I_x + M_{ey} x / I_y$$

di mana:

$$M_{ex} = (M_x - M_y I_{xy} / I_y) / D$$

$$M_{ey} = (M_y - M_x I_{xy} / I_x) / D$$

$$D = 1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y) \quad (1)$$

Dengan mendiferensialkan berturut-turut terhadap sumbu z (dimensi arah longitudinal) diperoleh gaya geser efektif sebagai berikut:

$$Q_{cx} = (Q_x - Q_y I_{xy} / I_y) / D$$

$$Q_{cy} = (Q_y - Q_x I_{xy} / I_x) / D \quad (2)$$

dan

$$W_{cx} = (W_x - W_y I_{xy} / I_y) / D$$

$$W_{cy} = (W_y - W_x I_{xy} / I_x) / D$$

W adalah beban

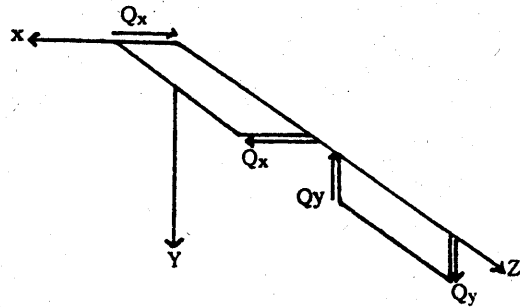
Perlu dicatat di sini bahwa besarnya I_x dan I_y pada persamaan (1) dapat ditukar-tukarkan dalam persamaan (2), karena gaya geser dan beban dalam arah x diperoleh dari diferensiasi momen lentur terhadap sumbu $y-y$ dan sebaliknya. Kembali ke shear flow, di mana:

$$q_s = q_0 - (Q_{ey} / I_x) \int_0^s t_y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t_x ds$$

Variabel S adalah jarak keliling profil pada titik yang dikehendaki, mulai dari setiap titik di mana shear flow q_0 diketahui.

Pada setiap open-end seperti akhir dari suatu sayap, harga $q_0 = 0$. Arah dari S dipilih sembarang saja. Tanda dari Q positif dapat ditentukan seperti Gambar 7.7 di bawah ini. Hasil q_s yang positif menunjukkan bahwa arah shear flow yang dipakai adalah benar.

Menentukan arah positif dari gaya lintang Q , seperti Gambar 7.7



Gambar 7.7: Arah positif gaya lintang Q

Contoh:

Hitunglah tegangan geser pada baja L 150 x 300 x 20 pada contoh di depan.

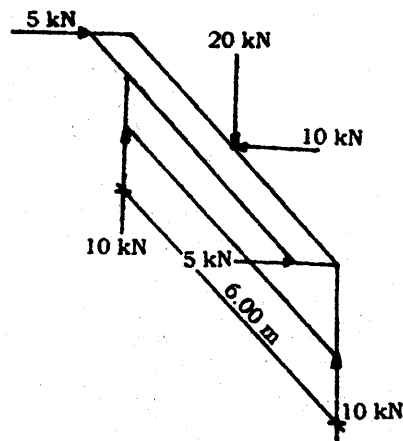
Jawab:

Telah dihitung di depan:

$$I_x = 80,44 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{xy} = -19,17 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 14,02 \times 10^6 \text{ mm}^4$$



Catatan:

Di sini Q_x adalah Q searah sumbu x bukan \perp sumbu x . Demikian juga Q_y adalah Q searah sumbu y bukan \perp sumbu y , karena gaya geser dan beban dalam arah sumbu x diperoleh dari diferensial momen lentur terhadap sumbu $y-y$ dan sebaliknya.

Gaya geser efektif searah sumbu x ialah:

$$Q_{ex} = (Q_x - Q_y I_{xy}/I_x) / D$$

dan gaya geser efektif searah sumbu y ialah:

$$Q_{ey} = (Q_y - Q_x I_{xy}/I_y) / D$$

di mana

$$D = 1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y)$$

Dari persamaan

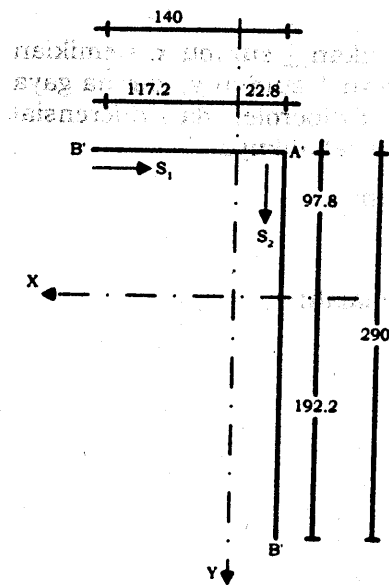
$$Q_{ex} = \frac{Q_x - Q_y I_{xy} / I_x}{1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y)}$$

diperoleh

$$\begin{aligned} &= \frac{5 \times 10^3 - 10 \times 10^3 \times (-19,17) / 80,64}{1 - (-19,17)^2 / (80,64 \times 14,02)} \\ &= 10,93 \times 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$

Dari persamaan

$$\begin{aligned} Q_{ey} &= \frac{Q_y - Q_x I_{xy} / I_y}{1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y)} \\ &= \frac{10 \times 10^3 - 5 \times 10^3 \times (-19,17) / 14,02}{1 - (-19,17)^2 / (80,64 \times 14,02)} \\ &= 24,97 \times 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$



Ditinjau kaki horisontal:

$$q_0 = 0$$

$$S = S_1$$

$$x = (117,2 - S_1) \text{ mm}$$

$$y = -97,8 \text{ mm}$$

$$t = 20 \text{ mm}$$

S_1 bekerja dari B' ke arah A'.

Karena dimulai dari ujung kaki horisontal, berarti $q_0 = 0$, sehingga rumus shear flow:

$$q_s = q_0 - (Q_{ey} / I_x) \int_0^s t y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t x ds$$

menjadi:

$$q_s = -(Q_{ey} / I_x) \int_0^s t y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t x ds$$

$$q_{s1} = \frac{-24,97 \times 10^3}{80,64 \times 10^6} \int_0^{s1} 20 \times (-97,8) ds_1$$

$$- \frac{10,93 \times 10^3}{14,02 \times 10^6} \int_0^{s1} 20 \times (-117,2 - S_1) ds_1$$

$$q_{s1} = \frac{-24,97 \times 10^3}{80,64 \times 10^6} 20 \times (-97,8) \int_0^{s1} ds_1$$

$$- \frac{10,93 \times 10^3}{14,02 \times 10^6} \times 20 \times 117,2 \int_0^{s1} ds_1$$

$$- \frac{10,93 \times 10^3}{14,02 \times 10^6} \times 20 \int_0^{s1} -S_1 ds_1$$

$$= -0,3096 \times 10^{-9} \times 20 \times (-97,8) \int_0^{s1} ds_1 - 0,78 \times 10^{-3} \times 20 \times 117,2$$

$$\int_0^{s1} ds_1 - 0,781 \times 10^{-3} \times 20 \int_0^{s1} -S_1 ds_1$$

$$= +605,5776 \times 10^{-3} S_1 - 1830,8984 \times 10^{-3} S_1 + 7,81 \times 10^{-3} S_1^2$$

$$= -1225,3288 \times 10^{-3} S_1 + 7,81 \times 10^{-3} S_1^2$$

$$= 0,00781 S_1^2 - 1,225 S_1$$

Persamaan shear flow:

$$q_{s1} = 0,00781 S_1^2 - 1,225 S_1$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa $q_{s1} = 0$ bila $S_1 = 0$.

Di B' $q_{s1} = 0$. Bila didiferensialkan ke S_1 maka diperoleh:

$$\frac{dq_{s1}}{ds_1} = 2 \times 0,00781 S_1 - 1,225 = 0$$

dari sini akan diperoleh titik belok

$$S_1 = \frac{1,225}{2 \times 0,00781} = 78,4 \text{ mm dari titik B'}$$

Jadi di titik 78,4 mm dari B' terjadi q_{s1} max.

Dari persamaan $q_{s1} = 0,00781 S_1^2 - 1,225 S_1$ dengan $S_1 = 78,4$ mm diperoleh $q_{s1 \text{ max}} = -47,96 \text{ N/mm}^2$

Dan pada titik A', yaitu pada jarak 140 mm dari B' diperoleh shear flow di titik A' sebesar:

$$q_{s1 \text{ A'}} = 0,00781 \times 140^2 - 1,225 \times 140 = -18,28 \text{ N/mm}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa arah shear flow adalah kebalikan dari arah S_1 .

Ditinjau kaki vertikal:

$$\begin{aligned}
 S &= S_2 \\
 x &= -22,8 \text{ mm} \\
 y &= (S_2 - 97,8) \text{ mm} \\
 q_o &= q_{A'} = -18,28 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

Harga-harga ini dimasukkan pada persamaan shear flow:

$$q_s = q_o - (Q_{ey} / I_x) \int_0^s t y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t x ds$$

Diperoleh persamaan:

$$q_{s2} = -18,28 + 0,9633 S_2 - 0,003104 S_2^2$$

Dari persamaan ini tampak bahwa di A' dengan $S_2 = 0$ diperoleh:

$$q_{s A'} = -18,28 \text{ N/mm}$$

Bila $q_{s2} = 0$ maka diperoleh $S_2 = 20,3 \text{ mm}$

$$\frac{dq_{s2}}{ds_2} = 0,9633 - 2 \times 0,003104 S_2 = 0$$

$$S_2 = \frac{0,9633}{0,006208} = 155,2 \text{ mm}$$

Di titik belok yang berjarak 155,2 mm dari A' akan diperoleh besarnya.

$$\begin{aligned}
 q_{s2 \text{ max}} &= -18,28 + 0,9633 \times 155,2 - 0,003104 \times 155,2^2 \\
 &= 56,48 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

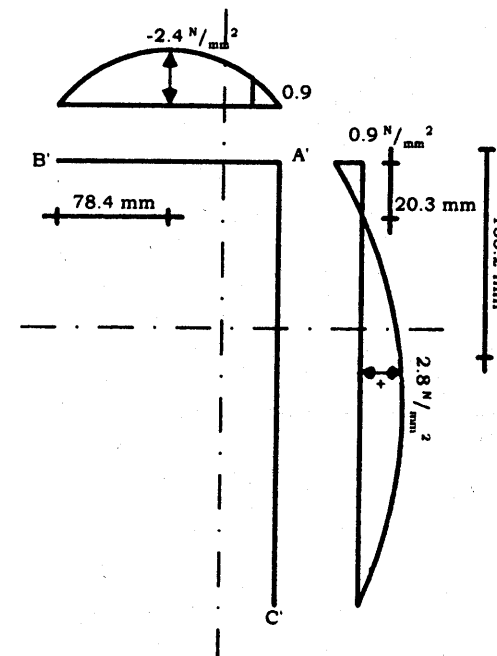
Tanda positif menunjukkan bahwa arah shear flow sesuai dengan arah S_2 .

Untuk mengeceknya, masukkan harga $S_2 = 290 \text{ mm}$ dalam persamaan q_{s2} sehingga akan diperoleh harga $q_{s2} \approx 0$ (OK).

Besarnya tegangan geser maksimum = shear flow / tebal (20 mm) maka:

$$\begin{aligned}
 \text{untuk kaki horisontal besarnya } \tau_{\text{max}} &= \frac{-47,96}{20} \\
 &= -2,4 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{untuk kaki vertikal besarnya } \tau_{\text{max}} &= \frac{56,46}{20} \\
 &= +2,8 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$



Di A' besarnya τ ialah:

$$\tau_A = \frac{-18,28}{20} = 0,9 \text{ N/mm}^2$$

Pada kaki B'A'

$$\tau_{\text{max}} = -2,4 \text{ N/mm}^2$$

Pada kaki A'C

$$\tau_{\text{max}} = +2,8 \text{ N/mm}^2$$

Gambar diagram tegangan geser.

Shear Centre

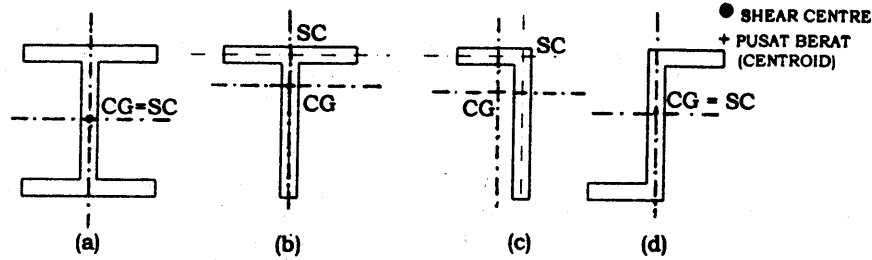
$$\text{Persamaan } q_s = q_o - (Q_{ey} / I_x) \int_0^s t y ds - (Q_{ex} / I_y) \int_0^s t x ds$$

ini hanya berlaku bila tidak terjadi puntir pada balok di penampang yang ditinjau. Torsi pada suatu penampang dapat disebabkan oleh suatu beban melintang jika resultante dari tegangan-geser dalam elemen-elemen dari penampang menghasilkan suatu puntir. Untuk mengimbangi ini, garis kerja dari beban yang dipakai harus melalui shear centre.

Pada penampang yang simetris shear centre terletak pada sumbu simetri dan beban-beban sepanjang sumbu semacam ini tidak menyebabkan puntir.

Pada beberapa penampang, posisi dari shear centre dapat diduga langsung dari arah shear flow.

Sebagai contoh, lihat gambar berikut:



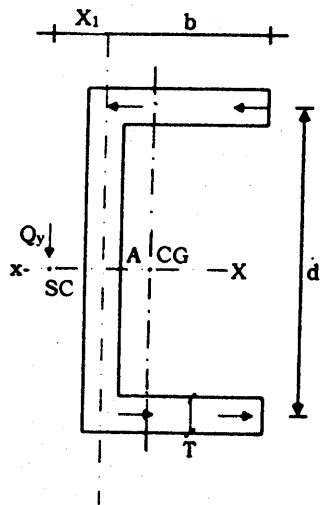
Letak dari shear centre.

Pada (a) shear centre terletak pada perpotongan sumbu-sumbu simetri dan bersamaan dengan pusat berat. Pada (b) dan (c) shear centre terletak pada perpotongan garis shear flow. Pada (d), jika sayapnya sama tebalnya, tegangan-tegangan gesernya berlawanan dengan torsi terhadap pusat berat, di mana juga sebagai shear centre.

Bila suatu penampang profil mempunyai satu sumbu simetri maka dapat dipakai rumus:

$$q_s = \frac{Q A Y_c}{I}$$

Sebagai contoh, pada kanal profil berikut mempunyai tebal sama, yaitu sebesar T.



Karena shear centre terletak pada sumbu simetri x-x, maka tidak perlu memperhitungkan Qx.

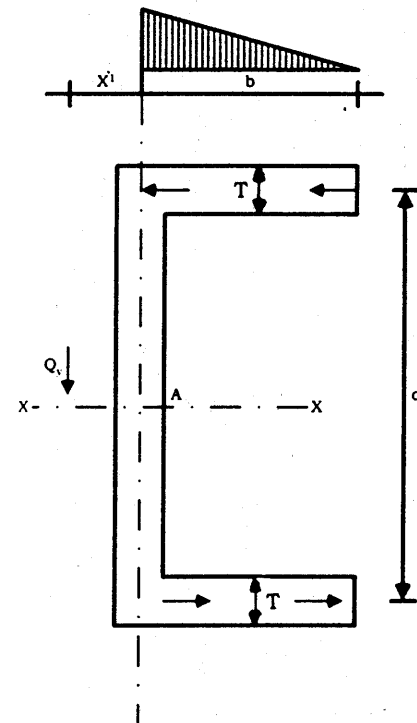
Jika titik A pada perpotongan sumbu x-x dengan garis berat dari badan dipandang sebagai *fulcrum* (titik putar), maka hanya shear force dalam sayap-sayap yang perlu diperhitungkan karena resultante shear force (gaya geser) dalam badan tidak menimbulkan momen terhadap A.

Dipakai rumus $q_s = \frac{Q A Y_c}{I}$

Untuk maksimum shear flow: $A = b T$; $Q = Q_y$;
 $Y_c = \frac{1}{2}d$ dan $I = I_x$

Diperoleh $q_{s \max} = \frac{Q_y b T d}{2 I_x}$

Distribusi dari shear flow pada sayap adalah sebagai berikut:



Resultance dari shear force = $\frac{1}{2} q_{s \max} b$

$$q_{s \max} = \frac{Q_y b T d}{2 I_x} \text{ maka}$$

$$\begin{aligned} \text{gaya geser} &= \frac{1}{2} \times b \times \frac{Q_y b T d}{2 I_x} \\ &= \frac{Q_y b^2 T d}{4 I_x} \end{aligned}$$

Torsi sekeliling A dari kedua sayap adalah sama dengan torsi yang ditimbulkan oleh beban Q_y yang melalui shear centre, maka:

$$Q_y X' = \frac{Q_y b^2 T d^2}{4 I_x}$$

di mana:

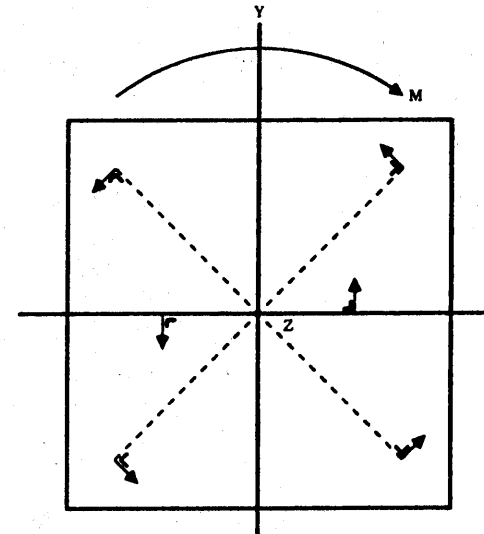
$$x' = \frac{b^2 d^2 T}{4 I_x}$$

-ooOoo-

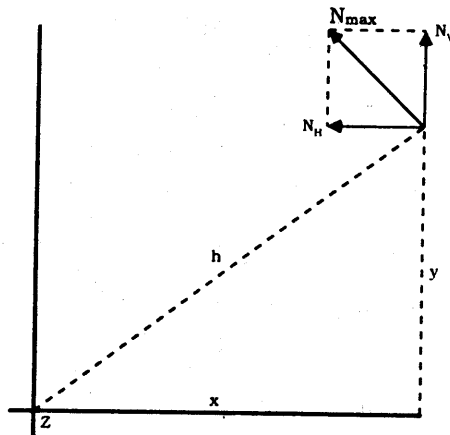
BAB VIII

SAMBUNGAN MOMEN DENGAN PAKU KELING/ BAUT

- Momen luar M diimbangi oleh momen dalam yang besarnya = M pula (arah berlawanan).
- Akibat M luar pada paku/baut maka timbul gaya-gaya reaksi \perp garis penghubung paku/baut dengan pusat berat z (z = pusat berat kelompok paku/baut)



- Besarnya gaya-gaya reaksi sebanding dengan jaraknya terhadap pusat berat z.
- Makin jauh paku/baut terhadap z, makin besar gaya reaksi paku/baut.
- Karena dipakai paku/baut yang ukurannya sama maka yang ditinjau cukup yang paling berbahaya, yaitu paku/baut yang terjauh dari z.



- Dipakai momen kelembaman polair dengan z sebagai sumbu kutub.

$$I_p = I_x + I_y$$

di mana: $I_x = \sum F \cdot y^2$ dan $I_y = \sum F \cdot x^2$

- Dipakai ukuran paku/baut yang sama besar. Jadi semua mempunyai luas tampang yang sama, yaitu sebesar F.

$$I_p = F \sum (x^2 + y^2)$$

Tegangan $\sigma = \frac{M h}{I_p}$

Untuk jarak paku/baut ke z = 1 cm (h = 1 cm)

$$\sigma_{1 \text{ cm}} = \frac{M \cdot 1}{I_p} = \frac{M \cdot 1}{F \sum (x^2 + y^2)}$$

$$N_{1 \text{ cm}} = \sigma_{1 \text{ cm}} \times F$$

$$N_{1 \text{ cm}} = \frac{M \cdot 1 \cdot F}{F \sum (x^2 + y^2)}$$

$$N_{1 \text{ cm}} = \frac{M \cdot 1}{\sum (x^2 + y^2)} \quad (\text{gaya reaksi pada paku/baut untuk jarak 1 cm dari z})$$

Untuk jarak h = r cm, maka:

$$N_{r \text{ cm}} = \frac{M \cdot r}{\sum (x^2 + y^2)}$$

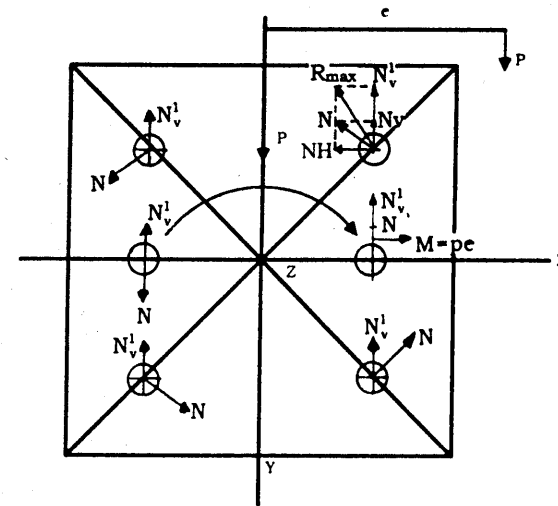
$$N_{r \text{ cm}} = N_{\text{max}} = \sqrt{N_H^2 + N_V^2}$$

dimana:

$$N_H = \frac{M y}{\sum (x^2 + y^2)} \quad \text{dan} \quad N_V = \frac{M x}{\sum (x^2 + y^2)}$$

Harga $N_{\text{max}} \leq$ daya dukung paku/baut yang diijinkan.

Gaya yang tidak melalui pusat berat z (eksentrisitas gaya terhadap pusat berat z).



- Gaya P mempunyai eksentrisitas e terhadap pusat berat kelompok paku/baut, diganti dengan: P melalui pusat berat z dan $M = P \cdot e$
- Gaya P yang melalui p.b. z dipikul sama rata oleh kelompok paku/baut, memikul beban vertikal:

$$N_v = \frac{P}{n} \quad (n = \text{banyaknya paku/baut})$$
- Akibat $M = P \cdot e$ maka dapat dicari besarnya N_H dan N_v sebagai berikut:

$$N_H = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)} \quad \text{dan} \quad N_v = \frac{M_x}{\sum(x^2 + y^2)}$$

di mana:

$h = \sqrt{x^2 + y^2}$ merupakan jarak paku/baut yang terjauh terhadap pusat berat z .

Dalam arah mendatar:
$$N_H = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)}$$

Dalam arah vertikal:
$$N_v + N'_v = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)} + \frac{P}{n}$$

$$N_{\max} = \sqrt{N_H^2 + (N_v + N'_v)^2} \leq \text{daya dukung paku/baut yang diijinkan.}$$

Contoh:

Suatu konsol pendek dari pelat tebal $\sigma = 12$ mm diapit oleh kolom || 16, disambung dengan paku keling $\phi = 17$ mm. Beban konsol $P = 8$ ton berjarak 50 mm dari tepi kolom seperti tergambar. Selidikilah kekuatan sambungan paku keling tersebut.

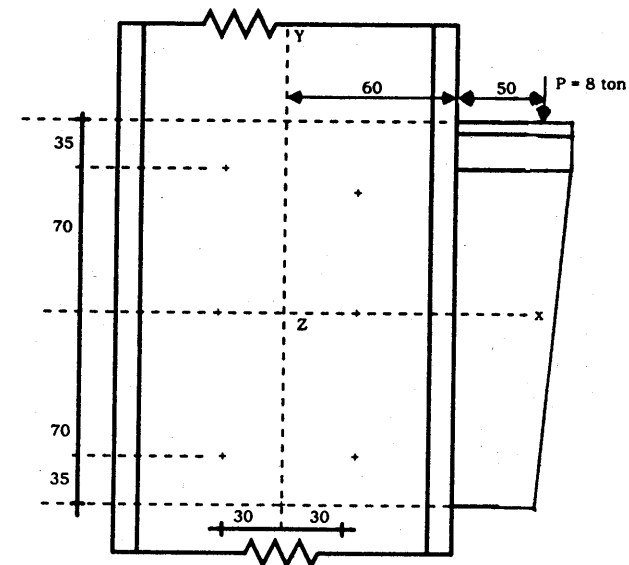
Jawab: (lihat gambar)

$$M = 8000 \times 13 = 104000 \text{ kg cm}$$

$$\begin{aligned} \sum(x^2 + y^2) &= 6 \times 3^2 + 4 \times 7^2 \\ &= 250 \text{ cm.} \end{aligned}$$

$$N_H = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)} \quad \text{x dan y adalah jarak h terjauh terhadap p.b. z di mana } h = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$N_v = \frac{M x}{\sum(x^2 + y^2)}$$



Jadi h yang terjauh ialah $x = 30$ mm dan $y = 70$ mm.

$$N_H = \frac{104000 \times 7}{250} = 2912 \text{ kg}$$

$$N_v = \frac{104000 \times 3}{250} = 1248 \text{ kg} \quad N'_v = \frac{8000}{6} = 1333 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} N_{\max} &= \sqrt{N_H^2 + (N_v + N'_v)^2} \\ &= \sqrt{2912^2 + (1248 + 1333)^2} = 3891 \text{ kg} \end{aligned}$$

Penyelidikan daya dukung yang diijinkan dari paku keling

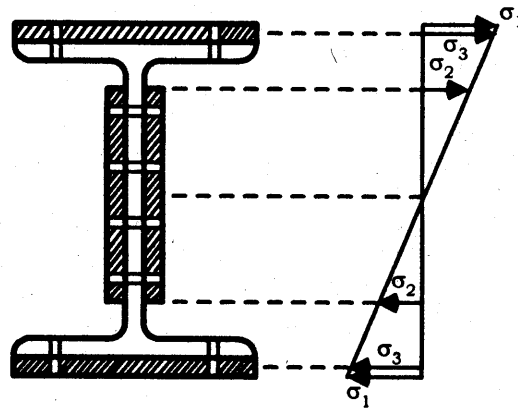
Sambungan irisan kembar:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi \times 1.7^2 \times 0.8 \times 1600 = 5813 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1.2 \times 1.7 \times 2 \times 1600 = 6528 \text{ kg}$$

Diambil $\bar{P} = 5813 \text{ kg} > 3891 \text{ kg}$ (OK)

Menyambung gelagar I yang terbelok (terlentur)



Dipakai:

- Pelat penyambung flens atas dan bawah.
- Pelat penyambung badan setangkup kiri-kanan.
- Bagian-bagian yang diarsir adalah pelat-pelat penyambung.
- Tebal pelat penyambung flens minimum = tebal flens.
- Tebal pelat penyambung badan masing-masing minimum = 0,7 x tebal badan.
- Gaya lintang D di tempat sambungan diterima oleh pelat penyambung badan yang telah diperlemah oleh lubang-lubang paku/baut.
- Momen lentur menimbulkan tegangan pada pelat penyambung badan.
- Gaya yang diterima oleh pelat penyambung flens diperoleh dengan mengalikan luas netto tampang pelat penyambung flens dengan σ_3 .

- Momen yang dipikul oleh pelat penyambung badan diperoleh dengan mengalikan σ_2 dengan w_{netto} dari kedua pelat penyambung badan ($M_1 = \sigma_2 \times W_n$).
- Kecuali itu pelat penyambung badan juga masih dibebani oleh momen akibat gaya lintang D, yaitu $M_2 = \frac{1}{2} D \times$ jarak antara pusat berat kelompok paku/baut kiri-kanan sambungan. Kalau pusat berat kelompok paku/baut kiri ialah z_2 pusat berat kelompok paku/baut kanan ialah z_1 maka $M_2 = \frac{1}{2} D \times z_1 z_2$.
- Gaya lintang D menimbulkan momen pada pelat penyambung badan sebesar $D \times z_1 z_2$ dan momen ini dibagi rata sama besar pada kelompok paku/baut bagian kiri dan kanan, masing-masing sebesar $M_2 = \frac{1}{2} D \times z_1 z_2$.

Jadi momen total yang dipikul satu kelompok paku/baut bagian kiri saja atau bagian kanan saja dari sambungan, yaitu sebagai berikut:

$$M_t > M_1 + M_2 = \sigma_2 W_n + \frac{1}{2} D \times z_1 z_2$$

Selain memikul momen M, kelompok paku/baut bagian kiri saja atau bagian kanan saja, juga memikul gaya D yang dibagi sama rata sama besar pada masing-masing paku/baut dalam kelompok.

Contoh:

Suatu profil INP 55 harus disambung. Akibat beban terbagi rata $q = 3,167 \text{ t/m}$ termasuk beratnya sendiri terjadi pada sambungan $M = 33,25 \text{ tm}$ dan $D = 6,334 \text{ t}$. Ukuran pelat penyambung dan penempatan paku keling seperti tergambar. ϕ paku keling = 26 mm.

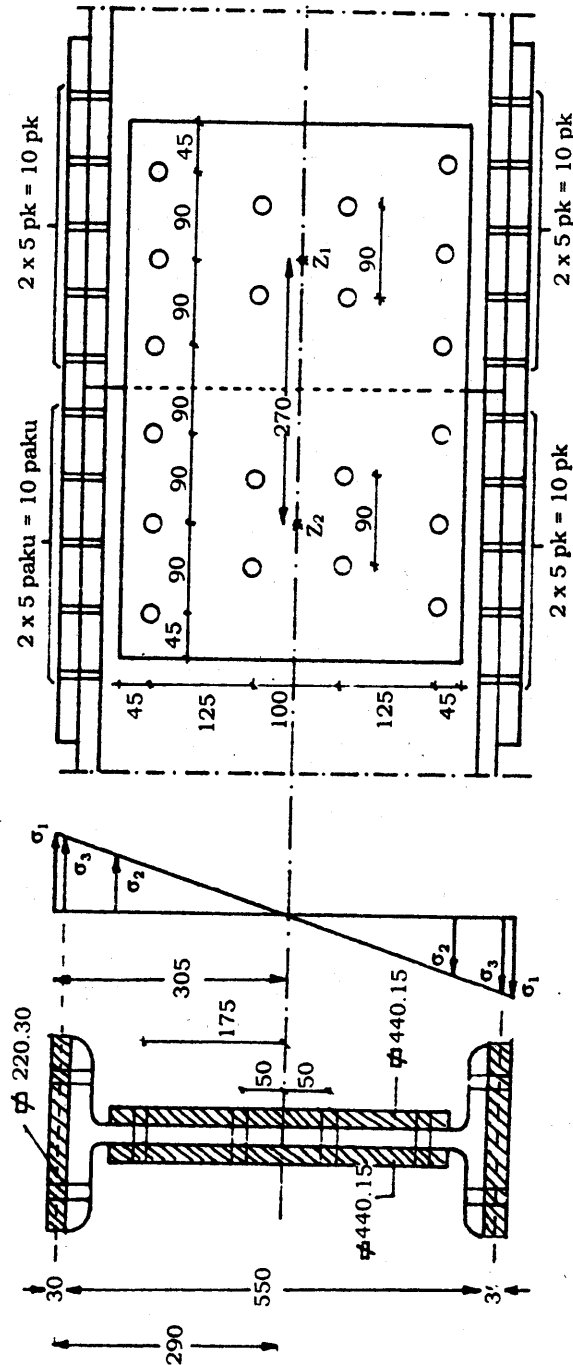
Diminta untuk menyelidiki kekuatannya.

Jawab:

INP 55 mempunyai:

$$\begin{aligned} h &= 550 \text{ mm} & t &= 30 \text{ mm} \\ b &= 200 \text{ mm} & d &= 19 \text{ mm} \end{aligned}$$

Mencari momen inersia netto. Untuk amannya dianggap tampang melintang mempunyai perlemahan lubang 8 buah. Ditinjau momen inersia yang diarsir (hanya pelat-pelat penyambungannya saja):



$$I = 2 \times \frac{1}{12} \times 22 \times 3^3 + 2 \times 66 \times 29^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 1,5 \times 44^3 - 4 \times 3 \times 2,6 \times 29^2 - 4 \times 1,5 \times 2,6 \times 29^2 - 4 \times 1,5 \times 2,6 \times 17,5^2 = 101000 \text{ cm}^4$$

$$W_1 = \frac{101000}{30,5} = 3311 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_1 = \frac{M}{W_1} = \frac{3325000}{3311} = 1004 \text{ kg/cm}^2$$

$$W_2 = \frac{101000}{22} = 4590 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{W_2} = \frac{3325000}{4590} = 724 \text{ kg/cm}^2$$

$$W_3 = \frac{101000}{29} = 3483 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_3 = \frac{M}{W_3} = \frac{3325000}{3483} = 955 \text{ kg/cm}^2$$

Paku pada sambungan flens harus menahan gaya:

$$K = F_{n \text{ p.p flens}} \times \sigma_3$$

$$K = (22 - 2 \times 2,6) \times 3 \times 955 = 48132 \text{ kg}$$

Sambungan pada flens: irisan tunggal:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi d^2 \tau = \frac{1}{4} \times 2,6^2 \times 0,8 \times 1600 = 6796 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = \delta d \bar{\sigma}_s = 3 \times 2,6 \times 2 \times 1600 = 24960 \text{ kg}$$

Jadi $\bar{P} = 6796 \text{ kg}$

Dipakai 10 paku keling, maka satu paku keling menerima beban

$$\text{sebesar } \frac{48132}{10} = 4813,2 \text{ kg}$$

$$< \bar{P} = 6796 \text{ kg} \dots (\text{OK})$$

Ditinjau pelat penyambung badan:

$$I_n = 2 \times \frac{1}{12} \times 1,5 \times 44^3 - 4 \times 1,5 \times 2,6 \times 5^2 - 4 \times 1,5 \times 2,6 \times 17,5^2$$

$$I_n = 16128 \text{ cm}^4$$

$$W_n = \frac{16128}{22} 733 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_2 = 724 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{W_n} \rightarrow M = W_n \times \sigma_2$$

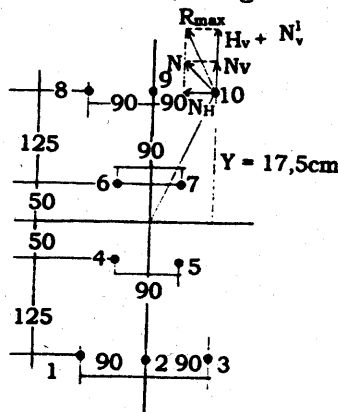
$$= 733 \times 724$$

$$= 530758 \text{ kg cm}$$

$$q_D = 6334 \text{ kg}$$

$$M_2 = \frac{1}{2} D z_1 z_2 = \frac{1}{2} \times 6334 \times 27 = 85509 \text{ kg cm}$$

$$M_{\text{total}} = 530758 + 85509 = 616267 \text{ kg cm}$$



Paku	x	y	x ²	y ²
1	-9	-17,5	81	306
2	0	-17,5	0	306
3	+9	-17,5	81	306
4	-4,5	-5	20	25
5	+4,5	-5	20	25
6	-4,5	+5	20	25
7	+4,5	+5	20	25
8	-9	+17,5	81	306
9	0	+17,5	0	306
10	+9	+17,5	81	306
		Σ	404	1936

Paku yang terjauh dari z (h terbesar) mempunyai x = 90 mm dan y = 175 mm.

$$\sum(x^2 + y^2) = 404 + 1936 = 2340 \text{ cm}^2$$

$$N_H = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)} = \frac{645000 \times 17,5}{2340} = 4824 \text{ kg}$$

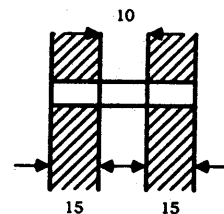
$$N_V = \frac{M x}{\sum(x^2 + y^2)} = \frac{645000 \times 9}{2340} = 2481 \text{ kg}$$

$$N'_V = \frac{6334}{10} = 633,4 \text{ kg}$$

$$N_{\text{max}} = \sqrt{N_H^2 + (N_V + N'_V)^2}$$

$$= \sqrt{4824^2 + (2481 + 633,4)^2} = 5742 \text{ kg}$$

Sambungan paku pada badan merupakan sambungan irisan kembar:



$$\bar{P} = \frac{1}{2} \times 2,6^2 \times 0,8 \times 1600 = 13597 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,9 \times 2,6 \times 2 \times 1600 = 15808 \text{ kg}$$

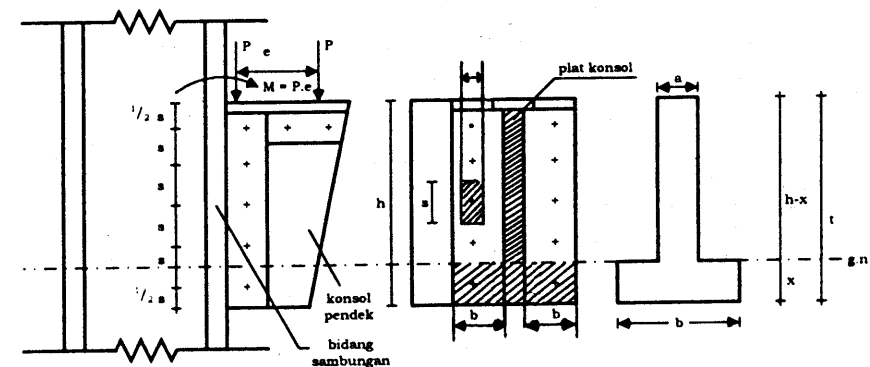
diambil $\bar{P} = 13597 \text{ kg} > N_{\text{max}} = 5742 \text{ kg} \dots$ (OK)

-ooOoo-

SAMBUNGAN YANG MEMIKUL MOMEN TEGAK LURUS BIDANG SAMBUNGANNYA

Ada dua cara yang dipakai, yaitu cara *Transformed Area Method* dan cara *Pendekatan*.

1. Cara Transformed Area Method



Gambar 9.1a Gambar 9.1b

Gambar 9.1

- Akibat beban P pada bidang sambungan maka terjadi $M = P.e$ dan beban vertikal P.
- Momen $P.e$ bekerja \perp pada bidang sambungan.

- Akibat M, konsol akan berputar terhadap garis netral, paku/baut bagian atas g.n. akan mengalami tarikan, sedang bagian bawah g.n. (yang diarsir) akan menekan flange dari kolom.
- Jika jarak antara paku/baut = s, maka luas dari paku/baut di atas g.n. (yang tertarik) dapat dinyatakan dengan luas pengganti (= luas rata-rata) yang berupa empat persegi panjang dengan lebar = a (lihat luas penampang pengganti satu baut (bagian yang diarsir) = a x s. Luas pengganti paku/baut ini = luas tampang paku/baut.

$$\frac{1}{4} \pi d^2 = a \times s$$

$$a = \frac{\pi d^2}{4} \times \frac{1}{s}$$

- Bagian di bawah garis netral, baja siku selebar b ditinjau 1/2 bagian menekan pada dinding kolom, sehingga luas yang ditransformed dapat dilihat pada Gambar 9.1 b
- Menentukan tempat g.n. pada gambar 9.1 b

$$a(h-x) \left(\frac{h-x}{2} \right) = b \times \frac{1}{2} x$$

$$(b-a)x^2 + 2ahx - ah^2 = 0$$

Dari persamaan ini dapat dicari x (tempat g.n. dari sisi bawah).

- Tegangan maksimum akibat momen yang terjadi pada paku/baut yaitu paku/baut yang paling atas = yang terjauh dari g.n.) = tegangan maksimum yang terjadi pada luas pengganti.
- Tegangan tarik maksimum pada paku/baut yang teratas = tegangan maksimum luas pengganti.

$$\sigma = \frac{M(h-x)}{2I_n} \text{ di mana } I_n = \frac{1}{3} a(h-x) + \frac{1}{3} b x^3$$

- Selain itu pada bidang sambungan bekerja gaya P vertikal yang didukung juga oleh ke-10 paku/baut, sehingga paku/baut yang teratas memikul beban sebesar 1/10 P, dan terjadi tegangan geser.

$$\tau = \frac{1_{10} P}{1_4 \pi d^2}$$

- Maka pada paku/baut yang teratas bekerja gaya geser dan gaya aksial secara bersamaan, sehingga terjadi tegangan kombinasi geser dan aksial pada paku/baut.

Menurut PPBBI: Untuk paku keling P:

Kombinasi tegangan geser dan tegangan tarik yang diijinkan:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 1,56 \tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

Untuk baut:

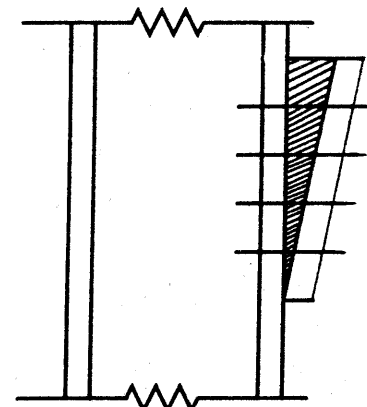
Kombinasi tegangan geser dan tegangan tarik yang diijinkan:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

2. Cara Pendekatan

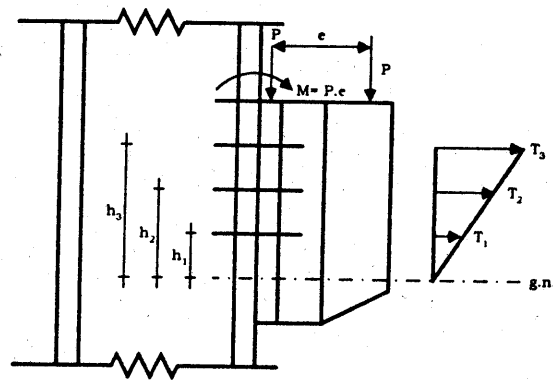
Bila dianggap bahwa kolom dan konsol adalah kaku sama sekali, tidak ada perubahan bentuk, akibat pembebanan pada konsol, maka konsol sebenarnya akan berputar terhadap titik yang paling bawah dari konsol.

Berhubung terjadinya strain pada alat sambung paku/baut di mana strain yang terbesar adalah di paku/baut yang paling atas, maka akan terjadi kelonggaran antara kolom dan konsol yang merupakan segitiga seperti gambar berikut ini.



Kelonggaran yang berbentuk segitiga ini (yang diarsir) tidak lain merupakan regangan (strain) dari masing-masing paku/baut. Karena bagian-bagiannya tidak lagi tetap bentuknya, titik putaran menjadi lebih tinggi, dan dalam prakteknya diambil titik putarnya jatuh pada paku/baut yang paling bawah. Strain yang terbesar pada paku/baut yang paling atas sedangkan pada paku/baut yang paling bawah di-

anggap sebagai titik putarnya (sebagai g.n.), sehingga besarnya gaya-gaya tarik aksial dari paku/baut adalah sebanding dengan jaraknya terhadap g.n (paku/baut yang paling bawah).



$$M = P e$$

$$T_1 = T_3 \frac{h_1}{h_3}$$

$$T_2 = T_3 \frac{h_2}{h_3}$$

$$T_3 = T_3$$

$$M = P e = (T_1 h_1 + T_2 h_2 + T_3 h_3) \times 2$$

$$M = \left[T_3 \frac{h_1^2}{h_3} + T_3 \frac{h_2^2}{h_3} + T_3 \frac{h_3^2}{h_3} \right] \times 2$$

$$M = 2 T_3 \left[\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}{h_3} \right]$$

$$T_3 = T_{\max} = \frac{M h_3}{2 (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)}$$

= gaya tarik terbesar dari paku/baut.

$$\sigma_{\max} = \frac{T_{\max}}{A} \quad (A = \text{luas tampang paku/baut})$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M h_3}{2A (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)}$$

= tegangan tarik maksimum pada paku/baut.

Selain memikul gaya tarik akibat momen = P e, paku/baut juga memikul gaya geser sebesar P. Gaya geser P ini dipikul oleh semua paku/baut masing-masing sama besar. Maka satu paku/baut yang paling atas memikul gaya geser 1/2 P/n (n = banyaknya paku/baut pada satu deret, kiri saja atau kanan saja). Jadi

pada konsol pendek tersebut di atas, satu paku/baut memikul beban $\frac{1}{2} \frac{P}{4} = \frac{1}{8} P$.

Akibatnya satu paku/baut memikul beban kombinasi gaya tarik aksial sebesar T_{\max} dan gaya geser $1/8 P$.

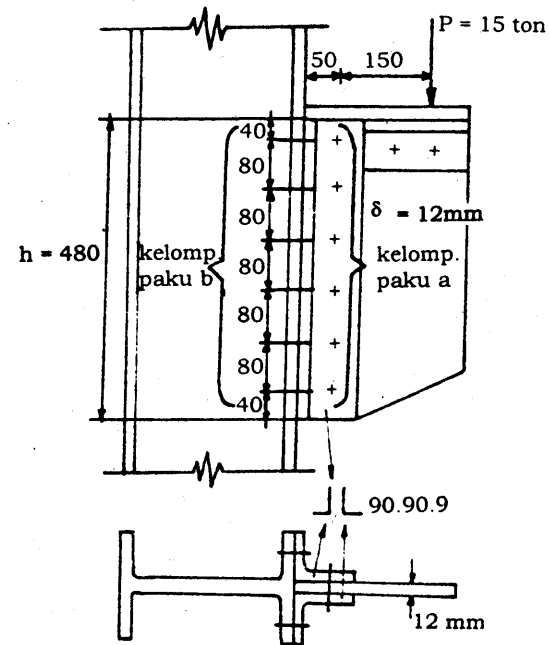
T_{\max} menimbulkan σ_{\max} } dari sini timbul tegangan idiiil
 $1/8 P$ menimbulkan τ } σ_i dan ini harus $\leq \bar{\sigma}$

Contoh:

Konstruksi konsol pendek dengan beban dan ukuran seperti tergambar. Dipakai paku $\phi = 17 \text{ mm}$. $\bar{\sigma}$ baja = 1600 kg/cm².

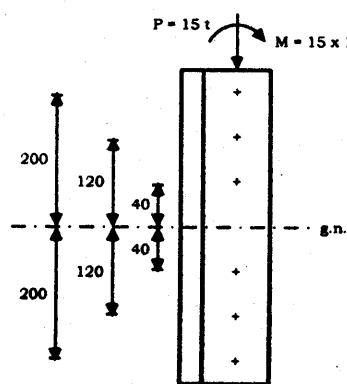
Ditanyakan:

- Selidikilah kekuatan sambungan paku keling pada kelompok a.
- Selidikilah kekuatan sambungan paku keling pada kelompok b.



Jawab:

a. Penyelidikan kelompok paku keling a.



$$\sum x^2 = 0$$

$$\sum y^2 = 2(4^2 + 12^2 + 20^2)$$

$$= 1120$$

P = 2174 kg = 2,174 ton
M = 2,174 x 15 = 32,61 t.cm

Akibat M:

$$N_H = \frac{M y}{\sum(x^2 + y^2)} = \frac{225 \times 20}{1120} = 4,02 \text{ ton}$$

= 32,61 x 20 / 1120 = 0,582 ton
= 0,36 ton

$$N_V = 0$$

Akibat P:

Tiap paku menahan gaya vertikal

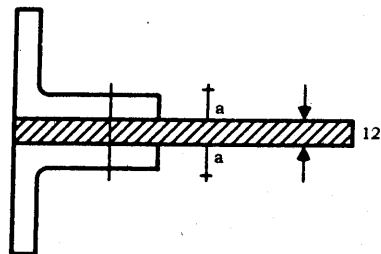
$$N_V = \frac{P}{6} = \frac{15}{6} = 2,5 \text{ ton}$$

= 2,174 / 6 = 0,36 ton

$$R = \sqrt{N_H^2 + N_V^2} = \sqrt{4,02^2 + 2,5^2} = 4,73 \text{ ton}$$

= \sqrt{0,582^2 + 0,36^2} = 0,68 t

Sambungan irisan kembar:



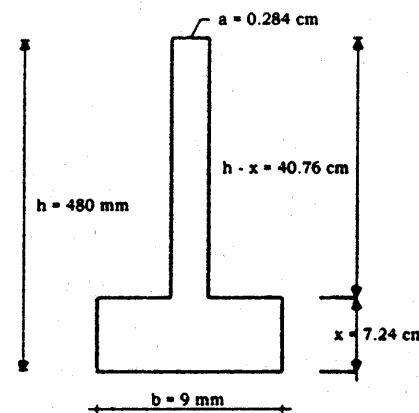
$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi \times 1,7^2 \times 0,8 \times 1600 = 5811 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,2 \times 1,7 \times 2 \times 1600 = 6258 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 5811 \text{ kg} > R = 4730 \text{ kg} \quad (\text{OK})$$

b. Penyelidikan kelompok paku keling b.

1. Dengan cara Transformed Area Method



$$a = \frac{\pi d^2}{4 s}$$

$$= \frac{\pi \times 1,7^2}{4 \times 8}$$

$$= 0,284 \text{ cm}$$

M yang terjadi di bidang geser antara flens kolom dengan \perp 90.90.9

$$M = 15000 \times 20 = 300.000 \text{ kg cm}$$

$$b = 90 \text{ mm} = 9 \text{ cm}$$

$$(b-a) x^2 + 2ahx - a h^2 = 0$$

$$(9-0,284) x^2 + 2 \cdot 0,284 \cdot 48 \cdot x - 0,284 (48)^2 = 0$$

$$x = 7,24 \text{ cm}$$

$$I_x = \frac{1}{3} b x^3 + \frac{1}{3} a (h-x)^3$$

$$= \frac{1}{3} \cdot 9 \cdot 7,24^3 + \frac{1}{3} \cdot 0,284 \cdot 40,76^3 = 7549 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_t = \frac{M (h-x)}{2 I} = \frac{300000 (40,78)}{2 \times 7549} = 810 \text{ kg / cm}^2$$

Akibat P:

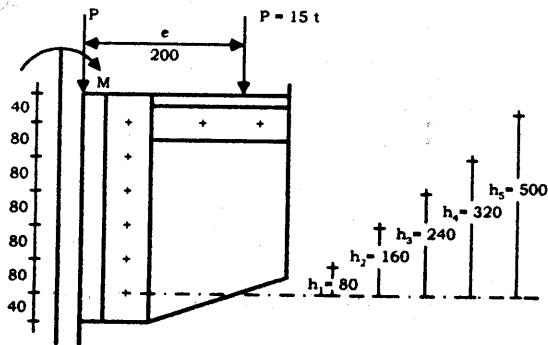
Tiap paku menerima gaya geser

$$= \frac{15000}{12} = 1250 \text{ kg}$$

$$\tau_{\text{paku}} = \frac{1250}{\frac{1}{4} \pi 1,7^2} = 550 \text{ kg/cm}^2$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_t = 810 \text{ kg/cm}^2 \\ \tau = 550 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right\} \sigma_i = \sqrt{810^2 + 1,56 \times 550^2} = 1062 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

2. Dengan Cara Pendekatan



$$\begin{array}{l} h_1^2 = 8^2 = 64 \\ h_2^2 = 16^2 = 256 \\ h_3^2 = 24^2 = 576 \\ h_4^2 = 32^2 = 1024 \\ h_5^2 = 40^2 = 1600 \\ \hline \sum h^2 = 3520 \end{array}$$

$$P = 15 \text{ ton}$$

$$M = 300.000 \text{ kg cm}$$

$$T_{\text{max}} = \frac{M h_5}{2 \sum h^2} = \frac{300000 \times 40}{2 \times 3520} = 1705 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}}}{F} = \frac{1705}{\frac{1}{2} \pi 1,7^2} = 751 \text{ kg/cm}^2 \text{ (F = luas tampang paku keling)}$$

Tiap paku keling menerima gaya geser:

$$\frac{1}{2} \times 15000 = 1250 \text{ kg}$$

$$\tau = \frac{1250}{\frac{1}{4} \pi 1,7^2} = 550 \text{ kg}$$

$$\sigma_i = \sqrt{751^2 + 1,56 \times 550^2} = 1018 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Kalau paku keling diganti dengan baut $\phi 7/8"$ ($d = 22,22 \text{ mm}$)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Diameter teras } d_1 = 18,61 \text{ mm} \\ F_{\text{teras}} = 3,575 \text{ cm}^2 \end{array} \right\} \text{dapat dibaca di tabel}$$

Untuk bagian baut yang tidak berulir: $d = 22,22 \text{ mm}$

$$F = \frac{1}{4} \pi 2,22^2 = 3,87 \text{ cm}^2$$

Sambungan kelompok baut a:

- Dipakai ukuran ϕ baut = 22,22 mm (Kalau menghitung F_{netto} dari plat yang disambung, dipakai ϕ lubang = 22,22 + 1 = 23 mm).

- Untuk baut:

$$\bar{\sigma}_{ta} = 0,7 \bar{\sigma}$$

$$\bar{\tau} = 0,6 \bar{\sigma}$$

$$\bar{\sigma}_{tu} = 1,5 \bar{\sigma} \quad \text{untuk } s_1 \geq 2d$$

$$\text{dan } = 1,2 \bar{\sigma} \quad \text{untuk } 1,5d \leq s_1 < 2d$$

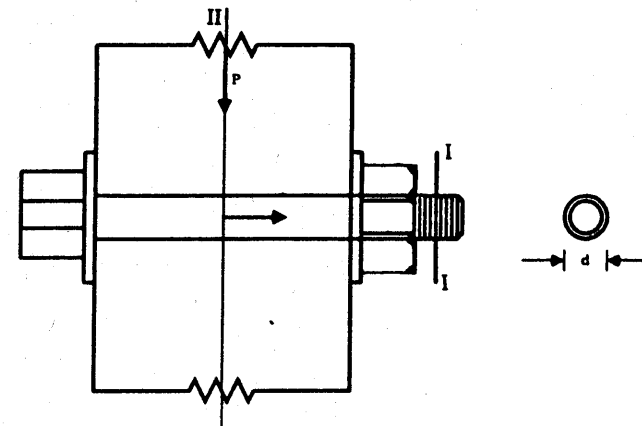
Sambungan irisan kembar: ($\delta = 1,2 \text{ cm}$)

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi \times 2,22^2 \times 0,6 \times 1600 = 7432 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,2 \times 2,22 \times 1,2 \times 1600 = 5115 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 5115 \text{ kg} > R = 4730 \text{ kg} \text{ (OK)}$$

Menghitung sambungan kelompok baut b:



Ditinjau dulu potongan I-I di mana terdapat ulir dengan $d_1 = 1,861$ cm (ukuran terkecil).

Sudah dihitung di muka:

$$T_{\max} = 1705 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{T_{\max}}{A_{\text{bgn ulir}}} = \frac{705}{\frac{1}{4} \pi 1,861^2} = 627 \text{ kg/cm}^2$$

$$< 0,7\bar{\sigma} = 0,7 \times 1600 = 1120 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Kemudian ditinjau potongan II-II:

Pada potongan ini (untuk satu baut) bekerja gaya geser P dan gaya tarik T.

$$P = 15 \text{ ton} \rightarrow P' = \frac{1}{12} \times 15000 = 1250 \text{ kg}$$

$$T = T_{\max} = 1705 \text{ kg}$$

Di sini dipakai ϕ baut utuh (diameter d) di mana mempunyai $A_{\text{baut}} = 3,87 \text{ cm}^2$

$$\sigma_{\max} = \frac{1705}{3,87} = 441 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau = \frac{1250}{3,87} = 323 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

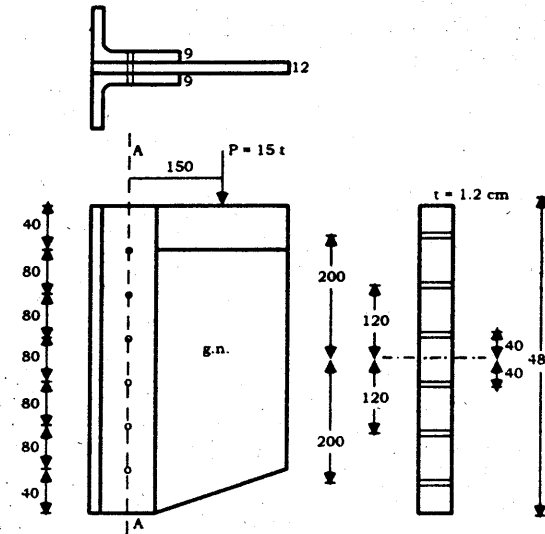
$$= \sqrt{441^2 + 3 \times 323^2}$$

$$= 712 \text{ kg/cm}^2$$

$$< 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Penyelidikan kekuatan pelat konsol:

Tebal plat konsol < tebal 2 kaki siku \perp 90.90.9. Yang dicek tebal terkecil ialah tebal plat konsol. Tebal plat konsol = 12 mm = 1,2 cm. Tinggi h plat konsol = 480 mm = 48 cm.



Ditinjau potongan di mana luas tampang terkecil ialah: A_{netto} pot A-A:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{A-A}}{W_{\text{net}}} \leq \bar{\sigma}$$

$$\tau_{\max} = \frac{3P}{2th} \leq 0,58\bar{\sigma}$$

$$M_{A-A} = 15 \times 15 = 225 \text{ ton cm} = 225.000 \text{ kg cm}$$

$$W_{\text{net}} = \frac{I_{\text{net}}}{\frac{1}{2}h} = \frac{\frac{1}{12} \times 1,2 \times 48^3 - 2 \times 2,3 \times 1,2 \times 20^2}{\frac{1}{2} \times 48}$$

$$= \frac{2 \times 2,3 \times 1,2 \times 12^2 + 2 \times 2,3 \times 1,2 \times 4^2}{\frac{1}{2} \times 48}$$

$$= 332 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{\max} = \frac{225.000}{332} = 678 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

$$\tau_{\max} = 1,5 \times \frac{15.000}{1,2 \times 48} = 391 \text{ kg/cm}^2$$

$$< 0,58\bar{\sigma} = 0,58 \times 1600 = 928 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

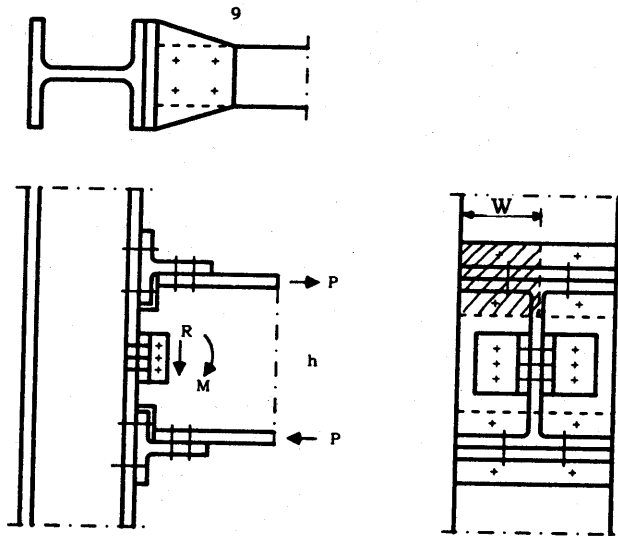
Sambungan antara konsol dengan kolom ini kuat menahan momen. Karena itu dinamakan sambungan momen (*momen connection*) atau *rigid connection* (sambungan kaku).

Sambungan momen semacam ini terdapat juga pada sambungan antara balok dengan kolom.

Sambungan momen ini ada banyak macamnya, di antaranya yang populer ialah sambungan momen dengan menggunakan:

1. *T connection* (sambungan yang mempergunakan profil T).
2. *End plate connection* (akhir dari balok diberi end-plate yang disambung dengan las antara ujung balok dengan end-plate)

Ditinjau T connection:



Gambar 9.2

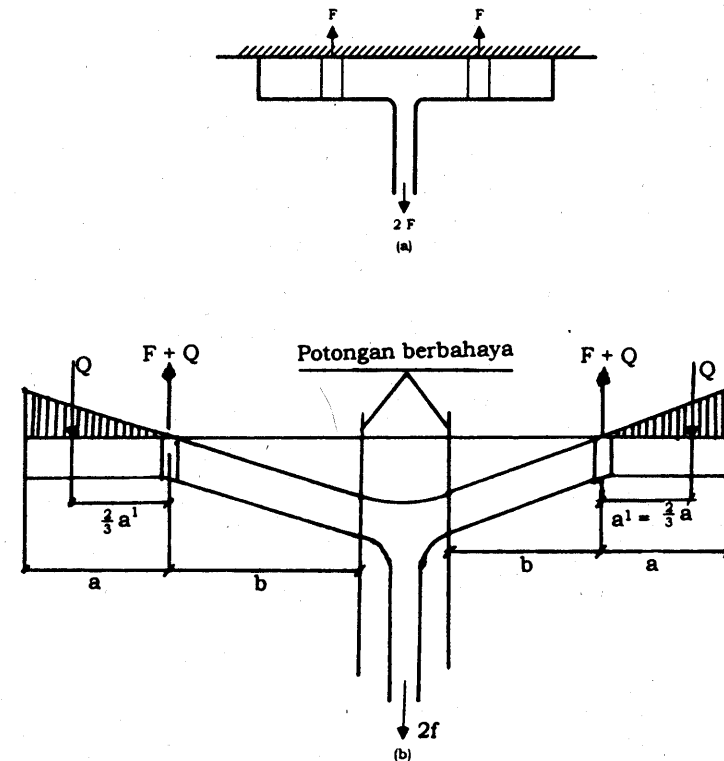
- Gaya reaksi R dipikul oleh paku/baut yang menghubungkan baja L dan badan balok, dan baja L dengan flange kolom.
- Momen M dipikul oleh paku/baut yang menghubungkan sayap baja T dengan flange kolom. Momen diubah dulu menjadi gaya aksial P pada flange atas dan bawah dari balok (lihat Gambar 9.2), sehingga $M = P h$ di mana h = tinggi balok.

$$P = \frac{M}{h}$$

Paku baut yang menghubungkan profil T dengan flange kolom bagian atas harus memikul gaya aksial tarik P ini.

- Gaya P sebagai pula gaya geser untuk sambungan antara badan profil T dengan sayap balok

Ditinjau profil T yang tertarik



Gambar 9.3

- Jika flange cukup tebal (kaku), maka tidak akan terjadi perubahan bentuk dari profil T seperti Gambar 9.3a, sehingga paku/baut menerima gaya tarik aksial sebesar F.
- Jika flange tidak kaku (tipis), maka profil T akan mengalami perubahan bentuk dari flange-nya, menjadi lengkung seperti Gambar 9.3b. Ujung-ujung flange akan menekan sehingga

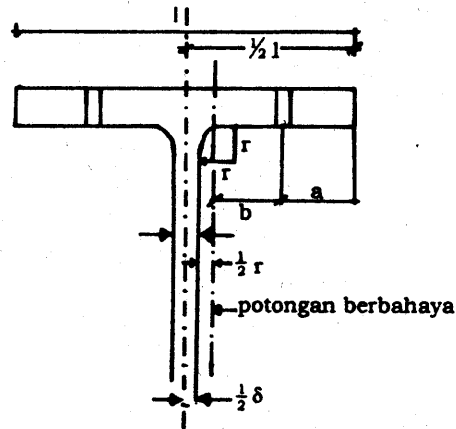
terjadi *prying force* Q seperti Gambar 9.3b. Jadi pada paku/baut tidak hanya terjadi gaya F saja, melainkan ada tambahan gaya Q . Jadi paku/baut menerima gaya tarik aksial $F+Q$.

Di sini *pretension* dari paku/baut tidak diperhitungkan. Besarnya Q ini menurut AISC ialah:

$$Q = \left[\frac{\frac{1}{2} \frac{W t^4}{30 a b^2 A_b}}{\frac{3 a}{4 b} \left(\frac{a}{4 b} + 1 \right) + \frac{W t^4}{30 a b^2 A_b}} \right] F$$

di mana:

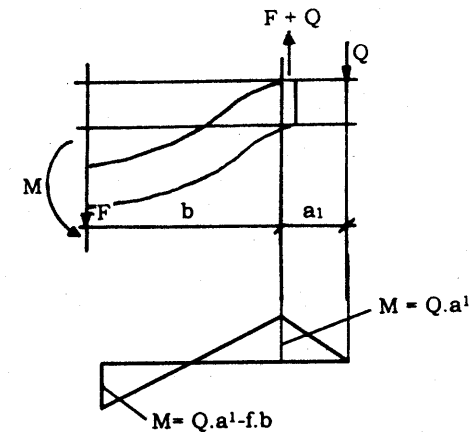
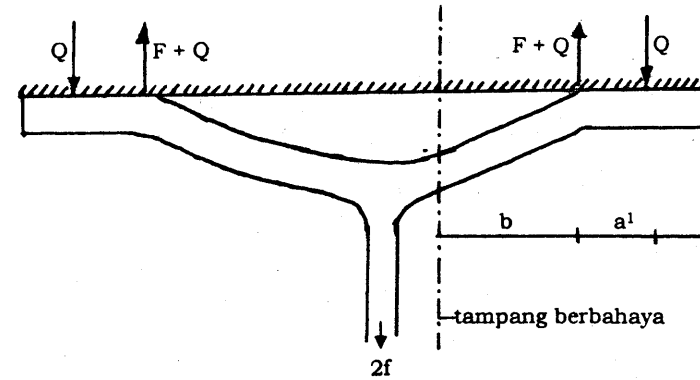
- A_b = luas tampang baut
- b = jarak antara paku/baut ke ikatan badan profil T
- a = jarak antara paku/baut dengan ujung flange jika $a < 1,25 b$, maka besarnya a diambil = $1,25 b$
- W = panjang flange diukur tegak lurus bidang gambar
- t = tebal flange dari profil T, kecuali bila t lebih tebal dari pelat penghubungnya yang lebih tipis dan tidak kaku, maka T diambil tebal yang terkecil.



$b = \frac{1}{2} l - a \left(\frac{1}{2} \delta + \frac{1}{2} r \right)$
 r dapat dibaca di tabel baja.

M pada potongan berbahaya dari flange profil T:

$$\begin{aligned} M &= Q (a'+b) - (F+Q) b \\ &= Q a' + Q b - F b - Q b \\ M &= Q a' - F b \end{aligned}$$



Meninjau kekuatan profil T

a. Bila harga dalam kurung dari rumus prying force Q ;

$Q = (> 0) F$, maka:
 $\sigma = \frac{M}{W} < \bar{\sigma}$ di mana $M = Qa - Fb$.

b. Bila harga dalam kurung dari $Q = (\leq 0) F$, maka:

$\sigma = \frac{M}{W} \leq \bar{\sigma}$ di mana $M = F b$.
 (tidak ada prying force)

Contoh soal:

Diketahui:

R = 17 t ; M = 6 tm. Kolom dari DIN 45. Balok dari IPE 50. Paku keling yang dipakai ϕ 19 mm. Rencanakan sambungan antara kolom dan balok dengan T connection.

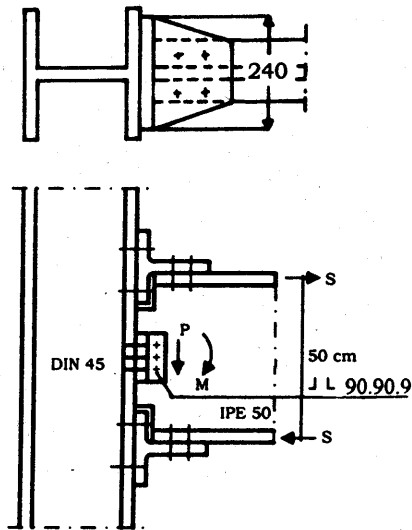
Catatan:

Profil IPE 50 mempunyai:

- Tebal flange t = 16 mm
- Tebal badan d = 10,2 mm
- Tinggi profil h = 50 cm

Profil T dipakai DIN 32, mempunyai:

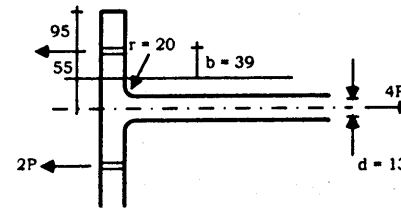
- t = 22 mm
- d = 13 mm
- r = 20 mm



Jawab:

Ditinjau dulu flange dari profil T apakah cukup kaku atau tidak. Jika Q = 0 atau negatif, berarti tak ada prying force pada paku keling, maka gaya tarik pada paku keling hanya ada gaya P saja akibat gaya S.

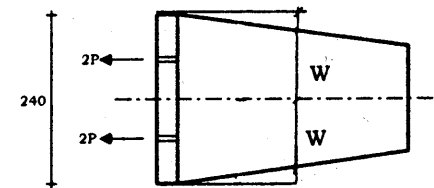
Jika ada prying force, berarti $Q > 0$, maka gaya tarik paku keling = $P + Q$.



$$b = 1/2 l - a - 1/2 d - 1/2 r$$

$$= 150 - 95 - 1/2 \times 13 - 1/2 \times 20$$

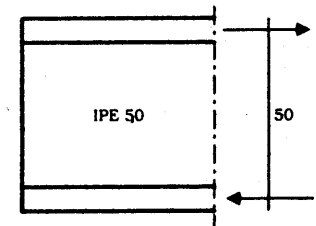
$$= 38,5 \text{ mm} \approx 39 \text{ mm}$$



$$a = 95 \text{ mm}$$

$$1,25b = 1,25 \times 39 = 48,75 \text{ mm}$$

$$\approx 49 \text{ mm}$$



a = 95 mm > 49 mm, maka dipakai a = 49 mm

$$W = \frac{240}{2} = 120 \text{ mm}$$

Momen M = 6 tm diubah menjadi gaya tarik pada flange atas dan gaya tekan pada flange bawah dari balok IPE 50.

$$S \times 50 = 600000 \rightarrow S = \frac{600000}{50} = 12000 \text{ kg}$$

$$S = 4 P \rightarrow P = 1/4 S = 1/4 \times 12000 = 3000 \text{ kg}$$

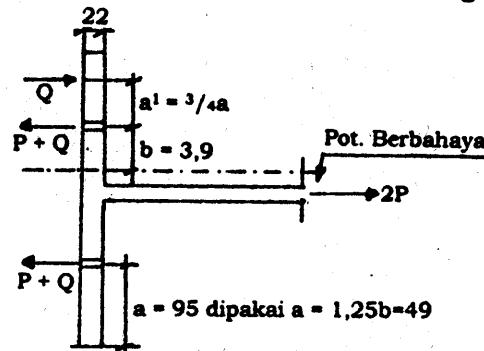
Tiap paku keling menerima gaya tarik 3000 kg

$$Q = \left[\frac{1}{2} \frac{W t^4}{30 a b^2 A_b} \right] F$$

$$= \left[\frac{3 a \left(\frac{a}{4 b} + 1 \right) + \frac{W t^4}{30 a b^2 A_b}}{4 b \left(\frac{a}{4 b} + 1 \right) + \frac{W t^4}{30 a b^2 A_b}} \right] F$$

$$Q = \left[\frac{\frac{1}{2} \frac{12.2,2^4}{30.4,9^2 \cdot 3,9^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 1,9^2}}{\frac{3 \cdot 4,9 \left(\frac{4,9}{4 \cdot 3,9} + 1 \right) + \frac{12.2,2^4}{30.4,9 \cdot 3,9^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 1,9^2}} \right] P$$

$$Q = 0,36 P = 0,36 \times 3000 = 1080 \text{ kg}$$



$$a = 49 \text{ mm} = 4,9 \text{ cm}$$

$$a' = \frac{3}{4} a = \frac{3}{4} \times 4,9$$

$$= 3,675$$

Gaya tarik pada tiap paku keling:

$$P + Q = 3000 + 1080 = 4080 \text{ kg}$$

$$M = Q \times a - P \times b = 1080 \times 4,9 - 3000 \times 3,9$$

$$= 6408 \text{ kg cm}$$

$$W = \frac{1}{6} \times 12 \times 2,2^2 = 9,66 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6408}{9,66} = 662 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Profil T yang dipakai cukup kuat.

Peninjauan paku keling yang menghubungkan flange kolom dengan flange profil T

$$\text{Gaya tarik paku keling} = P + Q = 4080 \text{ kg}$$

$$\text{Luas tampang paku keling} = \frac{1}{4} \pi \times 1,9^2 = 2,84 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{4080}{2,84} = 1419 \text{ kg/cm}^2 > 0,8 \times 1600 = 1280 \text{ kg/cm}^2 \text{ (t.m)}$$

Paku keling diperbesar menjadi ϕ 23 mm

Harga Q \approx 1080 kg, maka gaya tarik pada keling tetap = -4080 kg/cm²

$$\sigma = \frac{4860}{\frac{1}{4} \pi \times 2,3^2} = 901 \text{ kg/cm}^2 < 1280 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Paku keling ϕ 23 mm ini hanya dipakai untuk menyambung profil T dengan flange kolom saja. Untuk sambungan-sambungan bagian lainnya tetap dipakai paku keling ϕ 19 mm.

Sambungan antara flange balok IPE 50 dengan badan profil T:

Irisan tunggal $\delta = 13 \text{ mm} = 1,3 \text{ cm}$

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi \times 1,9^2 \times 1280 = 3631 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 3631 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,9 \times 1,3 \times 3200 = 7904 \text{ kg}$$

$$n = \frac{12000}{3631} = 3,31 \approx 4 \text{ paku keling}$$

(Kiri kanan masing-masing 2 paku keling)

Sambungan antara badan balok IPE 50 dengan \llcorner 90.90.10

Paku keling di sini hanya memikul R = 17 t saja.

Irisan kembar $\delta = 1,02 \text{ cm}$

$$\bar{P} = 2 \times \frac{1}{4} \pi \times 1,9^2 \times 1280 = 7261 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 6201 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,9 \times 1,02 \times 3200 = 6201 \text{ kg}$$

$$n = \frac{17000}{6201} = 2,74 \approx 3 \text{ paku keling}$$

Sambungan antara flange kolom dengan \llcorner 90.90.10

Paku keling disini hanya memikul R saja

Irisan tunggal $\delta = 1 \text{ cm}$

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi \times 1,9^2 \times 1280 = 3631 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 3631 \text{ kg}$$

$$n = \frac{17000}{3631} = 4,68 \approx 6 \text{ paku keling}$$

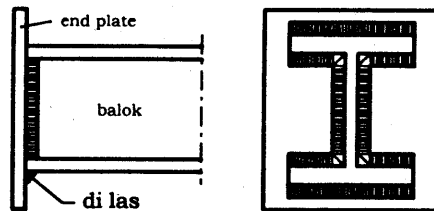
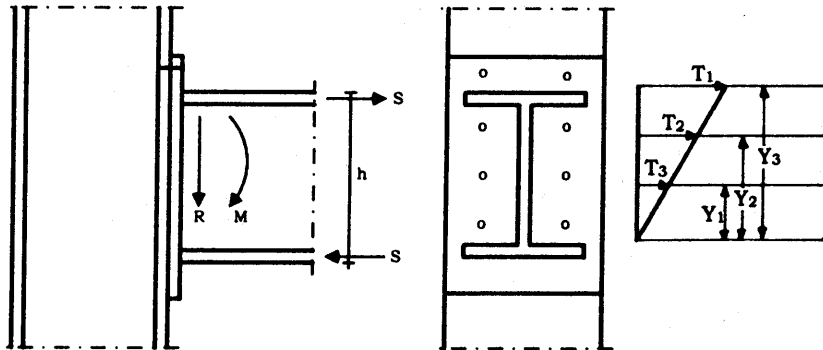
(Kiri kanan masing-masing 3 paku keling)

Catatan:

Supaya tidak mudah timbul kesalahan pada pemasangan, sebaiknya semua paku keling yang dipakai mempunyai ϕ yang sama, yaitu diambil yang terbesar ialah ϕ 23 mm.

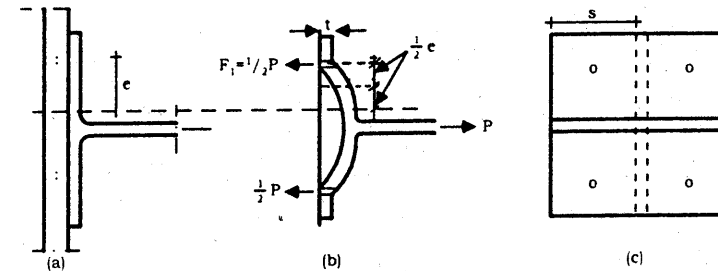
END PLATE CONNECTION

Untuk menghubungkan kolom dengan balok, pada ujung balok diberi *end plate*, yang selanjutnya antara end plate dengan kolom disambung dengan paku keling/baut. End plate dihubungkan dengan las kepada ujung balok seperti diperlihatkan pada gambar berikut:

**Hubungan antara kolom dengan balok:**

Cara mencari besarnya gaya tarik maksimum (paku keling/baut) yang teratas sama dengan cara pendekatan. Jadi paku keling/baut yang paling atas menerima gaya tarik $1/2 T_1$ dan gaya geser $R/8$.

Dapat pula dengan anggapan gaya S dari flange atas dari balok diterima oleh 4 paku keling/baut (dua baris teratas), sedangkan gaya geser R diterima oleh paku keling/baut di baris-baris di bawahnya (dianggap seperti T connection).

Mencari tebal end plate (plat akhir)

End plate akibat gaya tarik P akan melentur dalam *double curvature*. Besarnya momen lentur per baut ialah:

$$M = F_1 \times 1/2 e \text{ (lihat gambar 9.4b)}$$

Momen tahanan dari bagian pelat untuk satu baut:

$$W = \frac{s t^2}{6}$$

di mana:

t = tebal pelat sayap (flange T)

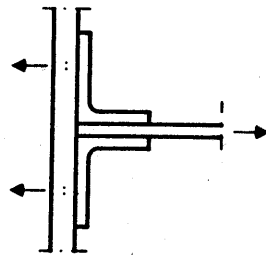
s = (lihat Gambar 9.4c)

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F_1 \frac{1}{2} e}{s t^2 / 6} = \frac{3 F_1 e}{s t^2} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{3 F_1 e}{s t^2} = \bar{\sigma} \rightarrow t^2 = \frac{3 F_1 e}{s \bar{\sigma}}$$

$$\rightarrow t_{\min} = \sqrt{\frac{3 F_1 e}{s \bar{\sigma}}} \text{ (} F_1 \text{ disini} = 1/4 P, \text{ yaitu untuk 1 paku keling/baut)}$$

Demikian juga untuk meninjau tebal baja L seperti gambar berikut ini, dapat dipakai rumus t_{\min} ini.



-ooOoo-

BAB

X

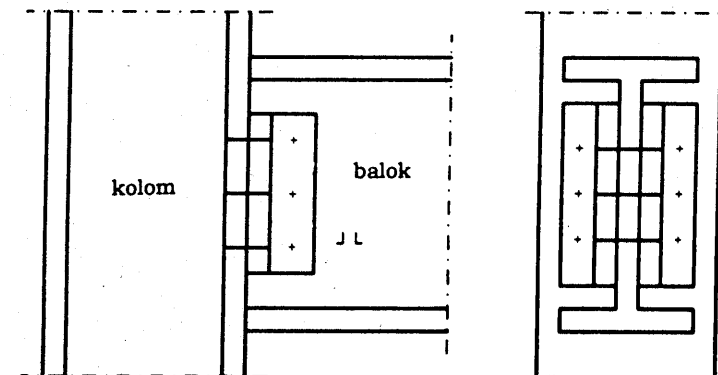
FRAMED CONNECTION DAN SEAT CONNECTION

Selain *rigit connection (moment connection)*, sambungan antara kolom dengan balok atau balok dengan balok, masih ada lagi jenis sambungan yang lain, yaitu:

1. *Framed Connection (flexible connection)*: hanya memikul gaya reaksi saja tanpa memikul momen.
2. *Seat Connection*: hanya memikul gaya reaksi saja tanpa memikul momen.

Framed Connection (Flexible connection)

Sambungan kolom dan balok:



- Paku/baut yang menghubungkan balok dengan baja L memikul gaya reaksi dari balok.
- Paku/baut yang menghubungkan flange kolom dengan baja L juga memikul gaya reaksi dari balok tadi.
- Tebal baja L harus dipilih sedemikian rupa sehingga:
 $t \geq 0,314 d$ $t = \text{tebal baja siku}$
 $d = \phi \text{ paku/baut}$

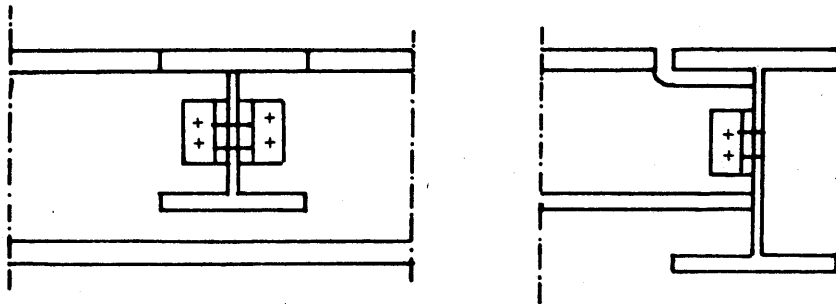
Sambungan antara balok dengan balok:

Ada beberapa macam sambungan ini:

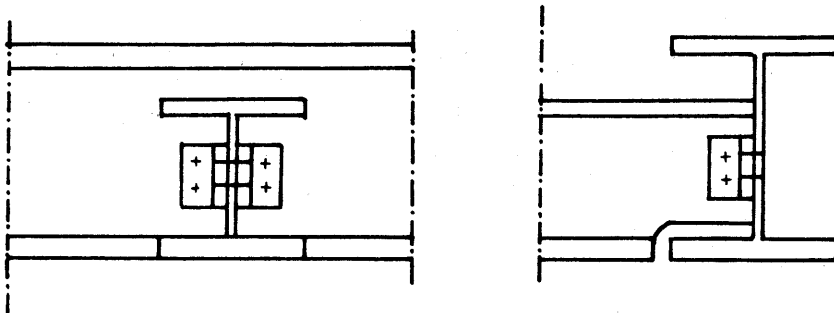
1. rata atas
2. rata bawah
3. balok yang kecil di tengah-tengah antara flange atas dan bawah dari balok yang besar.

Juga di sini paku/baut diperhitungkan hanya untuk menahan gaya reaksi saja.

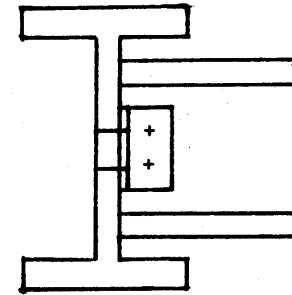
Sambungan balok-balok rata atas:



Sambungan balok-balok rata bawah:



Sambungan balok-balok yang kecil di tengah-tengah:



Contoh sambungan Framed Connection:

Diketahui:

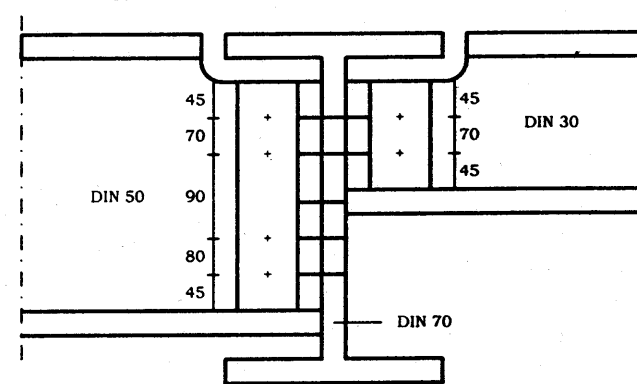
Reaksi balok DIN 50 : $R_1 = 27 \text{ ton}$

Reaksi balok DIN 30 : $R_2 = 12 \text{ ton}$

Dipakai paku $\phi 20 \text{ mm}$.

Selidiki apakah sambungan cukup kuat!

$\bar{\sigma}$ Baja = 1600 kg/cm^2



Jawab:

Ditinjau pemakaian baja L:

tebal baja L min = $0,314 d = 0,314 \times 20 = 6,28 \text{ mm}$

Dapat dipakai baja L dengan tebal $8 \text{ mm} > 6,28 \text{ mm}$

Dipakai]] 60.60.8

Untuk DIN 30 \rightarrow tebal badan = 12 mm

Dipakai]] 60.60.8 \rightarrow tebal L = 8 mm

$2 \times 8 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$

lebih kuat dari badan DIN 30

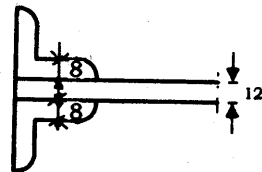
Kontrol pengaruh geser:

┐┌ 60.60.8 untuk DIN 30

Pada potongan II-II bekerja

Gaya $R_2 = 12$ ton

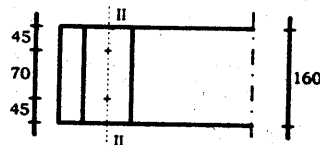
Luas tampang = $16 \times 0,8 = 12,8 \text{ cm}^2$
(Luas satu kaki baja siku ┐┌)



$$\tau = \frac{\frac{1}{2} \times 12000}{12,8} = 468,75 \text{ kg}^2$$

$$\tau < \bar{\tau} = 0,58 \times 1600$$

$$= 928 \text{ kg} / \text{cm}^2 \quad (\text{OK})$$



Untuk DIN 50:

Tebal badan = 16 mm

Dipakai ┐┌ 60.60.8 → tebal = $2 \times 8 = 16$ mm

sama kuatnya dengan badan DIN 50

Kontrol pengaruh geser:

┐┌ 60.60.8 untuk DIN 50

Pada potongan I - I bekerja

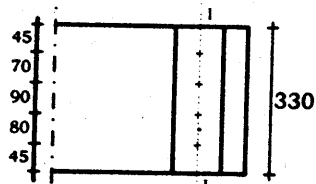
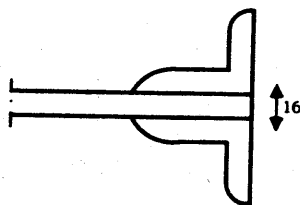
Gaya $R_1 = 27$ ton

Luas tampang = $33 \times 0,8 = 26,4 \text{ cm}^2$

$$\tau = \frac{\frac{1}{2} \times 27000}{26,4} = 511 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$\tau < \bar{\tau} = 0,58 \times 1600$$

$$= 928 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

**Sambungan baja ┐┌ 60.60.8 dengan badan DIN 30**

Sambungan irisan kembar

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 8046 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,2 \times 2 \times 2 \times 1600 = 7680 \text{ kg}$$

Diambil $\bar{P} = 7680$ kg



$$n = \frac{12000}{7680} = 1,56 > 2 \text{ paku (sesuai dengan gambar penempatan paku)}$$

Sambungan badan DIN 70 dengan baja ┐┌ 60.60.8

Sambungan irisan tunggal untuk bagian bawah dan sambungan irisan kembar untuk bagian atas.

Tebal badan DIN 70 = 18 mm

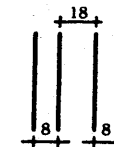
Tebal ┐┌ 60.60.8 = 8 mm

Ditinjau bagian atas irisan kembar:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 8046 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,6 \times 2 \times 1600 = 10240 \text{ kg}$$

Diambil $P = 8046$ kg



Ditinjau bagian bawah irisan tunggal:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 4023 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 0,8 \times 2 \times 2 \times 1600 = 5120 \text{ kg}$$

diambil $P = 4023$ kg



Kekuatan paku bagian atas : $4 \times 8046 \text{ kg} = 32184 \text{ kg}$

Kekuatan paku bagian bawah : $4 \times 4023 \text{ kg} = 16092 \text{ kg}$

Semua paku dapat memikul = 48276 kg

Sedang bahan yang dipikul: $27000 + 12000 = 39000 \text{ kg}$

$39000 \text{ kg} < 48276 \text{ kg} \quad \dots \quad (\text{OK})$

Seat Connection

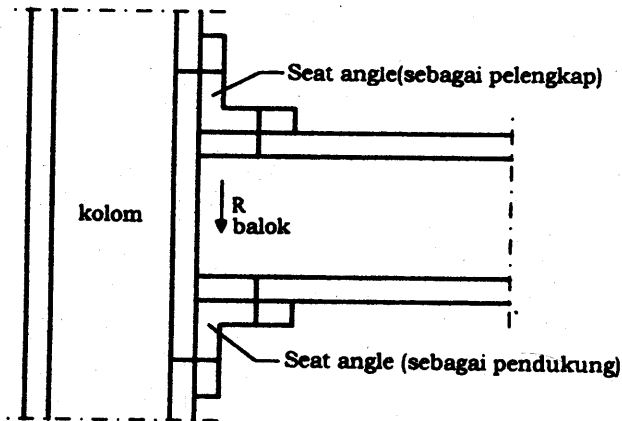
Seat Connection juga hanya memikul gaya reaksi saja tanpa memikul momen.

Ada dua macam Seat Connection, yaitu:

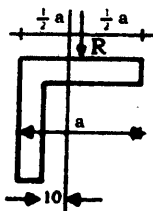
1. Unstiffened Seat Connection (tidak pakai pengaku)
2. Stiffened Seat Connection (dengan pengaku)

Pada Seat Connection, prinsipnya: balok didukung dengan pertolongan baja L pendukung (seat angle).

Unstiffened Seat Connection



- Reaksi balok di sini diterima oleh seat angle, diteruskan oleh seat angle pada kolom melalui paku/baut.
- Mengingat kemampuan baja L pendukung, reaksi balok yang di dukung maksimum ≈ 8 ton.
- Bila reaksi balok yang didukung > 8 ton, dipakai stiffened seat connection.
- Baja siku pendukung pada unstiffened seat connection ini harus diperiksa tegangan geser dan tegangan lenturnya yang terjadi pada penampang berbahaya.



- Penampang berbahaya dari seat angle terletak 10 mm dari permukaan kaki seat angle yang tegak.
- Gaya reaksi bekerja di tengah-tengah bidang kaki seat angle yang mendarat.
- Cleat angle (baja L pelengkap)
 - * Bertugas untuk mencegah Bergeraknya bagian atas dari balok
 - * Cleat angle tidak ikut mendukung gaya reaksi vertikal.

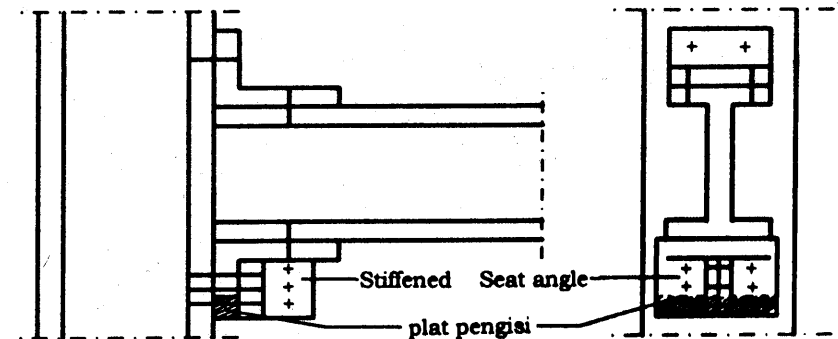
Stiffened Seat Connection

- Di sini seat angle diberi pengaku yang terdiri dari 2 baja siku yang setangkup (γr), yang dipasang rapat pada seat angle.
- Dapat menahan gaya reaksi yang lebih besar.
- Tegangan tumpu (*bearing stress*) yang terjadi pada baja pendukung dan pengaku tidak boleh melebihi tegangan tumpu ijin:

$$\bar{\sigma}_b = 1,35 \bar{\sigma}$$

Untuk baja Bj 37 tegangan ijin = $1,35 \times 1600$
= 2160 kg/cm^2

Bentuk stiffened seat connection adalah seperti gambar di bawah ini:



Contoh sambungan unstiffened seat connection

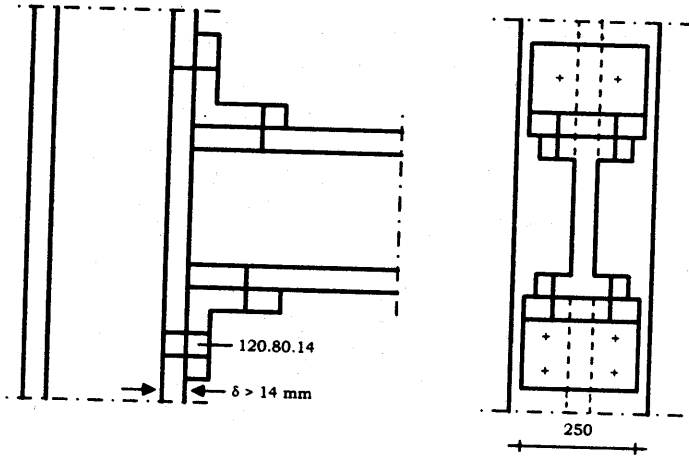
Diketahui:

Reaksi balok = 6 ton

ϕ Paku = 20 mm

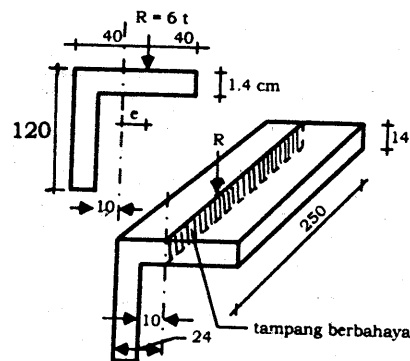
Seat angle: 120.80.14
 $\bar{\sigma}$ baja = 1600 kg/cm²

Ditanya apakah seat angle dan paku keling cukup kuat?



Jawab:

Diperiksa seat angle L 120.80.14



Ditinjau potongan berbahaya:

$$e = 40 - 14 - 10 = 16 \text{ mm} = 1,6 \text{ cm}$$

$$M = R \cdot e = 6000 \times 1,6 = 9600 \text{ kg cm}$$

$$W = \frac{1}{6} \times 25 \times 1,4^2 = 8,16 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{9600}{8,16} = 1176 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{3 R}{2 A} = \frac{3}{2} \times \frac{1600}{1,4 \times 25} = 257 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{\max} < 0,58 \bar{\sigma} = 928 \text{ kg/cm}^2 \dots (\text{OK})$$

Karena tampang adalah tipis setebal 14 mm = 1,4 cm, maka terjadinya σ_{\max} dan τ_{\max} dianggap pada satu titik yang sama, maka di sini perlu ditinjau tegangan kombinasinya σ_i (tegangan idii), yaitu sebesar:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

$$\text{Di sini } \tau \text{ diambil rata-rata sehingga } \tau = \frac{R}{A} = \frac{6000}{1,4 \times 25} = 171 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_i = \sqrt{1176^2 + 3 \times 171^2} = 1213 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2$$

Jadi seat angle ternyata cukup kuat.

Ditinjau kekuatan 4 paku ϕ 20 mm

Sambungan antara L 120.80.14 dengan kolom (flange kolom > 14 mm).

Sambungan irisan tunggal:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \times \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 4023 \text{ kg}$$

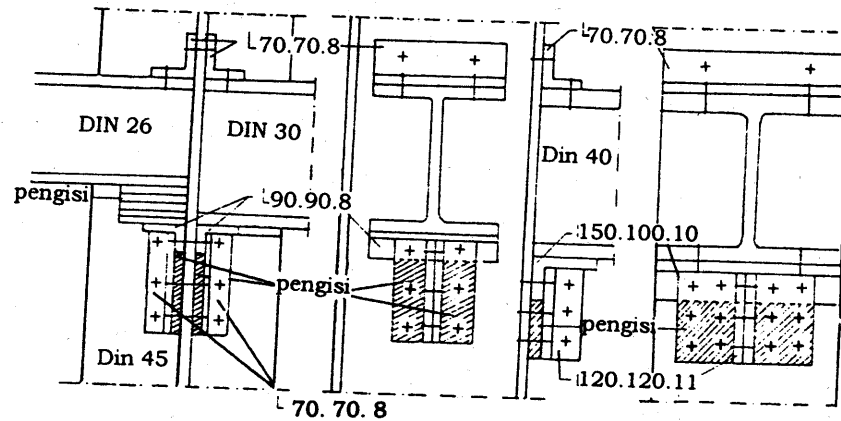
$$\bar{P} = 1,4 \times 2 \times 2 \times 1600 = 8960 \text{ kg}$$

Diambil $\bar{P} = 4023 \text{ kg}$

4 paku dapat mendukung $4 \times 4023 \text{ kg} = 16092 \text{ kg}$

$$16092 \text{ kg} > R = 6000 \text{ kg} \dots (\text{OK})$$

Contoh Stiffened Seat Connection



Diketahui:

- Reaksi balok DIN 26 : $R = 12$ ton
- Reaksi balok DIN 30 : $R = 12$ ton
- Reaksi balok DIN 40 : $R = 30$ ton
- Tebal badan DIN 26 : $t = 11$ mm
- Tebal badan DIN 30 : $t = 12$ mm
- Tebal badan DIN 40 : $t = 14$ mm

Ditinjau balok DIN 26:

Menentukan lebar kaki baja siku pendukung dari balok DIN 26 yang diperlukan.

Luas bidang tumpu pada badan DIN 26 (tebal badan DIN 26 : $t = 11$ mm)

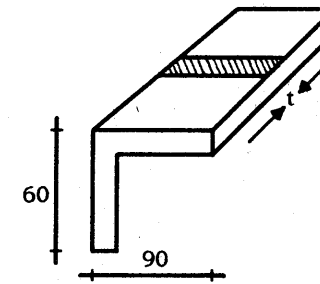
$$A = \frac{R}{\bar{\sigma}_b} = \frac{12000}{1,35 \times 1600} = 5,56 \text{ cm}^2$$

$$\text{Lebar yang diperlukan } \frac{A}{t} = \frac{5,56}{1,1} = 5,05 \text{ cm}$$

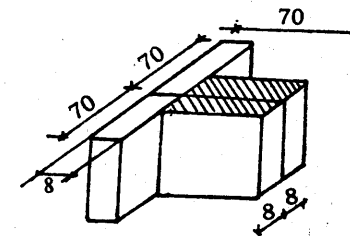
Diambil lebar baja L pendukung 9 cm = 90 mm > 5,05 cm

Dipakai L 90.60.8

Kaki mendatar baja L ialah 90 mm.



Ditinjau bidang tumpu dari pengaku:



Luas bidang tumpu pengaku ialah bagian yang diarsir:

$$= 2 \times (7 - 0,8) \times 0,8 = 9,92 \text{ cm}^2 > 5,56 \text{ cm}^2 \quad \dots \text{ (OK)}$$

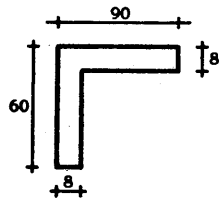
Ditinjau balok DIN 30 (dengan $t = 12$ mm)

■ Luas bidang tumpu pada badan DIN 30 yang diperlukan

$$A = \frac{R}{\bar{\sigma}_b} = \frac{15000}{1,35 \times 1600} = 6,94 \text{ cm}^2$$

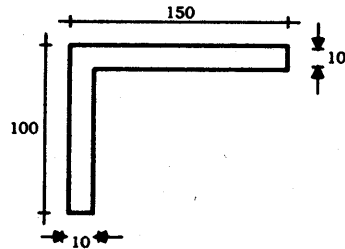
$$\text{Lebar yang diperlukan: } \frac{A}{t} = \frac{6,94}{1,2} = 5,78 \text{ cm}$$

Diambil lebar 9 cm > 5,78 cm, dipakai baja siku L 90.60.8 kaki yang 90 mm sebagai bidang tumpu DIN 30



- Ditinjau pengaku L 70.70.8, mempunyai luas bidang tumpu = $9,92 \text{ cm} > 6,94 \text{ cm}^2$ (OK)

Ditinjau balok DIN 40 (dengan $t = 14 \text{ mm}$)



- Luas bidang tumpu pada badan DIN 40

$$A = \frac{R}{\bar{\sigma}_b} = \frac{30000}{1,35 \times 1600} = 13,89 \text{ cm}^2$$

$$\text{Lebar yang diperlukan} = \frac{13,84}{1,4} = 9,92 \text{ cm}$$

Dipakai baja L 150.100.10

Lebar kaki mendatar baja L 150.100.10 ialah $150 \text{ mm} > 9,92 \text{ mm}$

- Ditinjau pengaku L 120.120.11 mempunyai luas bidang tumpu:

$$2 \times (12 - 1,1) \times 1,1 = 23,98 \text{ cm}^2 > 13,89 \text{ cm}^2 \text{ (OK)}$$

Perhitungan paku keling:

Ditinjau sambungan antara DIN 26 dan DIN 30 dengan badan kolom DIN 45

Sambungan antara pengaku L 70.70.8 (untuk DIN 26 dan DIN 30) dan kolom.

Sambungan antara badan kolom DIN 45 dengan pengaku L 70.70.8

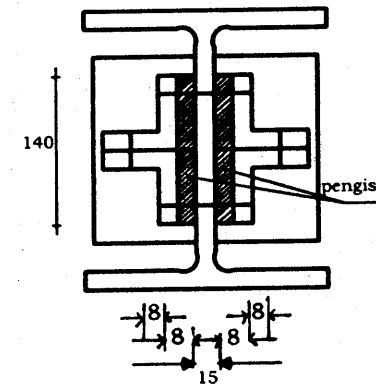
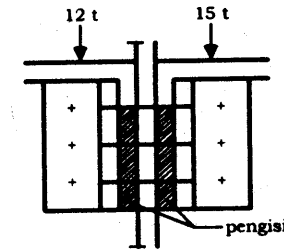
Sambungan irisan kembar:

$$P = \frac{1}{2} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 8046 \text{ kg}$$

$$P = 1,5 \times 2 \times 2 \times 1600 = 9600 \text{ kg}$$

Jadi $\bar{P} = 8046 \text{ kg}$

Beban yang harus dipikul: $12 \text{ ton} + 15 \text{ ton} = 27 \text{ ton}$
 $= 27000 \text{ kg}$



Banyak paku tanpa pengisi: $n = \frac{27000}{8046} = 3,356$

Banyaknya tambahan paku akibat adanya pengisi:

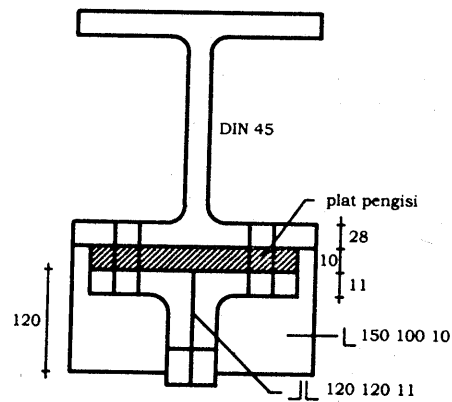
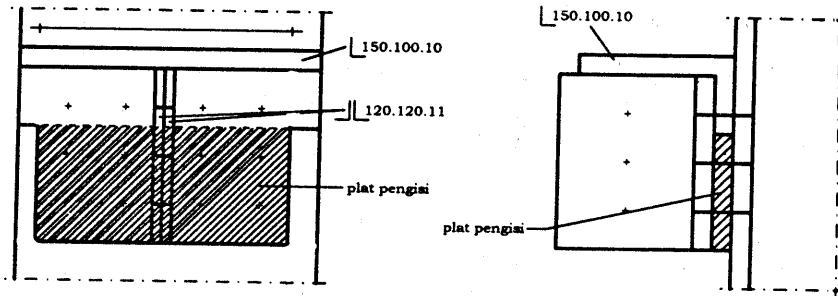
$$n \geq \frac{N A_b}{\bar{N} (A + A_b)} = \frac{27000 \times 0,8 \times 14}{8046 \times (14 \times 0,8 + 14 \times 0,8)} = 1,678$$

Banyaknya paku yang ada pelat pengisinya:

$$3,356 + 1,678 = 5,03 \text{ paku}$$

Kenyataan ada 6 paku > 5,03 paku (OK)

Sambungan antara flange kolom DIN 45 dengan balok DIN 40



Sambungan antara pengaku \llcorner 120.120.11 dengan flange kolom dengan tebal flange = 28 mm.

Sambungan irisan tunggal:

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \pi \times 2^2 \times 0,8 \times 1600 = 4023 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 1,1 \times 2 \times 2 \times 1600 = 7040 \text{ kg (11 mm < 28 mm)}$$

Diambil $\bar{P} = 4023 \text{ kg}$

$$\text{Banyak paku tanpa pengisi} = \frac{30000}{4023} = 7,457$$

Tambahan paku:

$$n \geq \frac{N A_b}{\bar{N} (A + A_b)} = \frac{30000 \times 2,4 \times 1}{4024 \times (1,1 \times 24 + 24 \times 1)} = 3,551$$

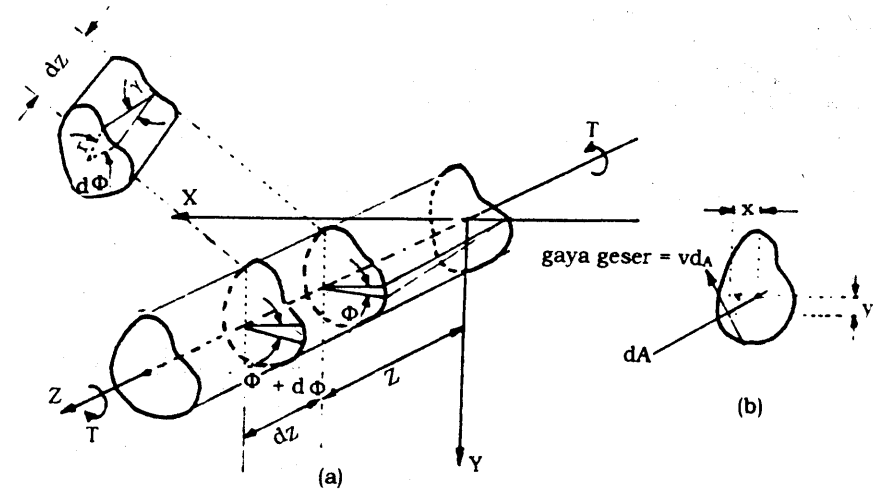
Banyak paku seluruhnya : $7,457 + 3,551 = 11 \text{ paku}$
 Kenyataan dipakai 12 paku > 11 paku ... (OK)

-ooOoo-

TORSI MURNI PURE TORSION— SAINT VENANT'S TORSION

Torsi murni ini dapat terjadi jika *warping* dari penampang melintang ditahan. *Warping torsion* ialah terjadinya perpindahan ke samping. Flange yang tertekan membengkok ke arah lateral sedangkan flange yang tertarik membengkok ke arah yang lain.

Ditinjau momen torsi T yang bekerja pada suatu bidang yang solid dan dari bahan yang homogen yang mempunyai penampang melintang yang prismatis seperti gambar di bawah ini:



Gambar 11.1

Dianggap tidak ada warping pada sudut puntir ϕ (angle of twist), juga selanjutnya dianggap tidak terjadi distorsion pada penampang selama twisting. Rate of twist θ (twist per satuan panjang) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\theta = \frac{d\phi}{dz}$$

yang dapat dipikirkan sebagai torsional curvature (rate of change of angle).

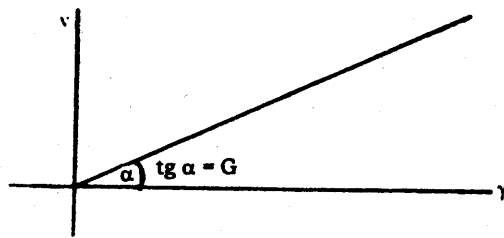
Jika *relative rotation* dari penampang melintang di z dan dz menyebabkan strain maka besarnya *displacement* pada titik yang ditinjau adalah proporsional terhadap jarak r dari pusat twist.

Strain angle γ atau unit shear strain pada setiap elemen yang berjarak r dari pusat ialah:

$$\gamma dz = r d\phi \rightarrow \gamma = r \left(\frac{d\phi}{dz} \right) = r \theta$$

Menurut hukum Hooke:

$$v = \gamma G$$



$$G = \frac{v}{\gamma} \rightarrow v = \gamma G$$

Menurut Gambar 11.1b torsi pada satu elemen:

$$dT = r v dA = r \gamma G dA = r^2 \left(\frac{d\phi}{dz} \right) G dA$$

Jumlah momen penahan untuk kesetimbangan ialah:

$$T = \int_A r^2 \frac{d\phi}{dz} G dA$$

$\frac{d\phi}{dz}$ dan G adalah konstanta pada setiap potongan:

$$T = \frac{d\phi}{dz} G \int_A r^2 dA = G K \frac{d\phi}{dz}$$

$$\text{dimana } K = \int_A r^2 dA$$

Persamaan $T = G K \frac{d\phi}{dz}$ dapat digambarkan sebagai analog dengan lenturan di mana momen lentur $M =$ kekakuan EI x curve line d^2y/dz^2

Maka momen torsi $T =$ kekakuan torsi GK x torsional curvature (rate of change of angle) $d\phi/dz$.

Mencari Shear Stress

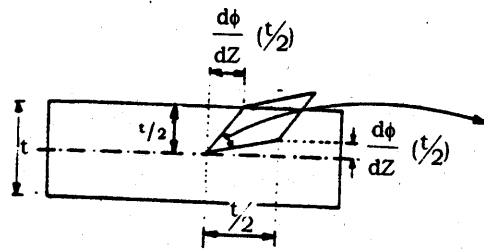
$$\left. \begin{array}{l} v = G \gamma \\ \gamma = r \frac{d\phi}{dz} \end{array} \right\} \begin{array}{l} v = r \frac{d\phi}{dz} G \\ \frac{d\phi}{dz} = \frac{T}{G K} \end{array} \left. \begin{array}{l} v = \frac{T}{G K} G \\ v = \frac{Tr}{K} \end{array} \right\}$$

Tampak bahwa torsional shear stress adalah proporsional dengan jarak radial (r) dari pusat twist. Untuk penampang lingkaran yang mempunyai diameter t dan $K =$ momen inersia polar $= \pi t^4 / 32$ Jadi untuk maksimum shear stress pada $r = t/2$:

$$V_{\max} = \frac{16 T}{\pi t^3}$$

Penampang Segi Empat

Analisis yang dipakai untuk penampang persegi panjang menjadi kompleks karena shear stress dipengaruhi oleh warping, meskipun angle of twistnya tidak dipengaruhi. Sebagai pendekatan ditinjau satu elemen yang menerima shear di mana $= t \frac{d\phi}{dz}$



Gambar shear strain berubah dalam sudut ini =

$$\gamma = 2 \frac{d\phi}{dz} \left(\frac{t}{2} \right) = \frac{d\phi}{dz} t$$

Untuk segi empat yang tipis mengabaikan efek terakhir shear stressnya sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} v &= \gamma G = t G \frac{d\phi}{dz} \\ \frac{d\phi}{dz} &= \frac{T}{G K} \end{aligned} \right\} v = \frac{T t}{K}$$

Menurut *Theory of elasticity*, shear stress maksimum v_{max} terjadi pada titik tengah sisi yang panjang dari segi empat dan bekerja sejajar dengan sisi tersebut. Besarnya adalah fungsi dari ratio b/t (panjang/lebar) dan dinyatakan sebagai berikut:

$$v_{max} = \frac{k_1 T}{b t^2}$$

dan konstanta torsinya K dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K = k_2 b t^3$$

di mana harga k_1 dan k_2 dapat diperoleh dari tabel sebagai berikut:

b/t	k_1	k_2
1, 0	4, 81	0, 141
1, 2	4, 57	1, 666
1, 5	4, 33	0, 196
2, 0	4, 07	0, 229

b/t	k_1	k_2
2, 5	3, 88	0, 249
3, 0	3, 75	0, 263
4, 0	3, 55	0, 281
5, 0	3, 44	0, 291
∞	3, 00	0, 333

Profil-profil I, C T dan H

Tampak bahwa harga-harga k_1 dan k_2 untuk b/t yang besar adalah hampir konstan sehingga torsional constant (K) untuk bentuk-bentuk yang terdiri dari gabungan plat-plat persegi panjang yang tipis dapat dihitung sebagai jumlah dari harga-harga untuk masing-masing komponen.

Pendekatan semacam ini, dengan mengabaikan adanya kontribusi dari daerah sambungan las (fillet region), ternyata hanya akan mengakibatkan kesalahan sedikit saja sehingga untuk kebanyakan profil yang umum seperti I, C T dan H dapat dipakai rumus sebagai berikut:

$$K = \sum 1/3 b t^3$$

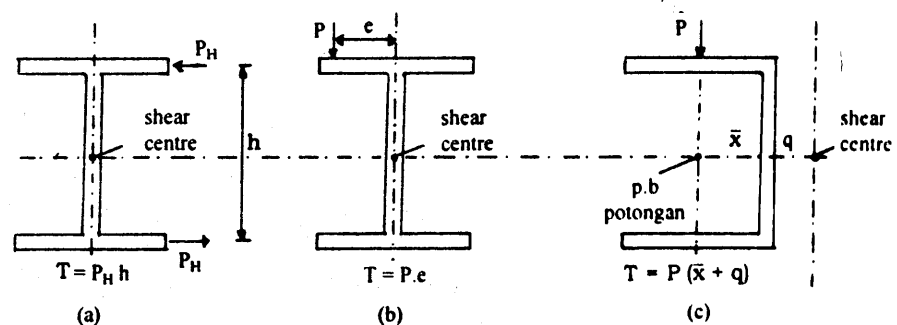
di mana b = ukuran panjang
 t = ukuran yang pendek

Catatan:

Pada puntir murni (*Saint Venant's torsion*) dianggap bidang penampang melintangnya tetap rata setelah terjadi puntir dan hanya terjadi rotasi dari elemen selama terpuntir. Kejadian yang hanya menahan puntir murni saja, ialah pada batang yang berpenampang lingkaran.

Bentuk-bentuk lain seperti profil I, C dan lain-lain selain menahan puntir juga menahan warping torsion karena flangennya berpindah ke arah lateral selama terjadi twisting.

Kejadian yang umum terdapat pada profil baja I dan C ialah terjadinya puntir karena bidang beban tidak melalui shear center, seperti gambar berikut ini:



Gambar 11.2

Pada profil I dan Z shear center berhimpit dengan pusat berat potongan.

Pada profil C dan L shear center tidak berhimpit dengan pusat berat potongan.

Pada Gambar 11.2c, bila P bekerja melalui shear center tidak akan terjadi puntir ($T=0$).

Jika sebagai *flexural curvature* (perubahan pada slope per satuan panjang) dapat dinyatakan sebagai $M/EI = d^2y/dz^2$, ialah momen dibagi kekakuan lentur = flexure curvature, maka torsi murni juga analog seperti pada lentur, yaitu momen torsi dibagi kekakuan torsi GK = torsional curvature (change in angle of twist

per unit length). $T/GK = \frac{d\phi}{dz}$

T = momen torsi, selanjutnya diberi nama M_s . Oleh sebab itu untuk torsi murni berlaku rumus:

$$M_s = G K \frac{d\phi}{dz}$$

di mana:

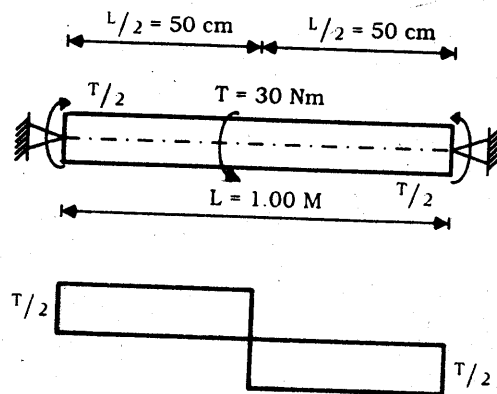
M_s = Momen torsi murni (Saint Venant's torsion)

G = Modulus elastisitas geser = $E/2(1+\mu)$

μ = Poisson's ratio

K = Konstanta torsi

Contoh:

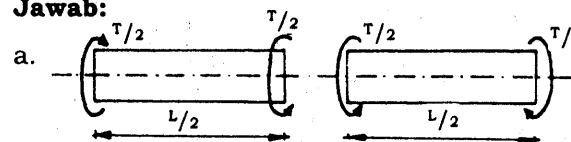


Suatu batang bulat dengan diameter $t = 10$ mm memikul beban momen puntir $T = 30$ Nm. Kedua perletakan merupakan simple supported terhadap torsi. Bj 37.

Hitunglah:

- Tegangan geser akibat torsi (V_{max})
- Sudut puntir ϕ

Jawab:



Ditinjau $\frac{1}{2}$ bagian ialah $\frac{1}{2} L$ (lihat teori puntir).

Rumus $V_{max} = \frac{16 T}{\pi t^3}$ berubah menjadi $V_{max} = \frac{16 T/2}{\pi t^3}$

$$T = 30 \text{ Nm} = 3 \text{ kgm} = 300 \text{ kgcm}$$

$$\frac{1}{2} T = \frac{1}{2} \times 300 = 150 \text{ kgcm}$$

$$V_{max} = \frac{16 \times 150}{\pi \times 1^3} = 763,6 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\tau} = 0,85 \times 1600$$

$$= 929 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

b.

$$T = G K \frac{d\phi}{dz}$$

$$\text{momen torsi} = \frac{1}{2} T$$

$$\frac{1}{2} T = G K \frac{d\phi}{dz}$$

$$\frac{1}{2} T = G K \frac{d\phi}{dz} \rightarrow \frac{d\phi}{dz} = \frac{T}{2GK} \rightarrow d\phi = \frac{T}{2GK} dz$$

$$\phi = \frac{T}{2GK} \int_0^L dz = \frac{T}{2GK} \left[z \right]_0^L = \frac{TL}{2GK}$$

$$\phi = \frac{TL}{4GK}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

$$T = 30 \text{ Nm}$$

$$G = \frac{E}{2(1-\mu)} = \frac{2,1 \times 10^6}{2(1-0,3)} = 0,81 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 81 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$K = \frac{\pi t^4}{32} = \frac{\pi}{32} \times 0,01^4 = 9,82 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

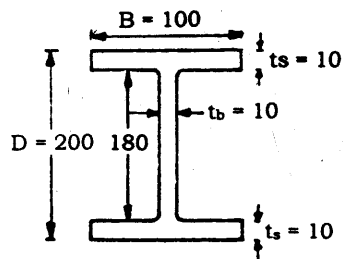
$$\phi = \frac{TL}{4GK} = \frac{30 \times 1}{4 \times 81 \times 10^9 \times 9,82 \times 10^{-10}} = \frac{30 \times 1}{4 \times 81 \times 9,82}$$

$$= 0,0943 \text{ radian}$$

Kalau dijadikan derajat dikalikan $\frac{360}{2\pi}$

$$\phi = \frac{360}{2\pi} \times 0,0943 = 5,4^\circ$$

Contoh untuk menentukan konstanta torsi K dari profil bertampang I. Misalnya, profil seperti tergambar:



$$K = \sum \frac{1}{3} b t^3$$

t ukuran yang terkecil

b ukuran yang terbesar

$$K_s = \left(\frac{1}{3} \times 10 \times 1^3\right) \times 2 = 6,667$$

$$K_b = \frac{1}{3} \times 18 \times 1^3 = 6$$

$$K = 12,667 \text{ cm}^4$$

-ooOoo-

BAB XII

WARPING TORSION DAN KIP

Balok I pada Gambar 12.1 menerima momen torsi $M_z (=T)$, maka sayap yang tertekan membengkok dengan arah lateral sedangkan sayap yang tertarik membengkok ke dalam arah yang berlawanan. Kejadian inilah yang disebut sebagai *warping*. Akibat warping ini maka penampang yang semula rata (datar), menjadi tidak rata lagi.

Pada Gambar 12.1 di mana balok ditahan terhadap puntir (twisting) pada ujung-ujung perletakannya, tetapi sayap bagian atas melendut dengan arah lateral sebesar u_f . Ini merupakan *lateral flange bending*. Lenturan ini menyebabkan tegangan-tegangan normal melintang lebar sayap maupun tegangan-tegangan geser.

Jadi puntir (torsian) dapat digambarkan sebagai gabungan dari dua bagian:

1. rotasi dari elemen, sebagai bagian torsi murni,
2. translasi yang menghasilkan lateral bending, sebagai bagian warping.

Sehingga torsi yang bekerja dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_{\text{tot}} = T_1 + T_2$$

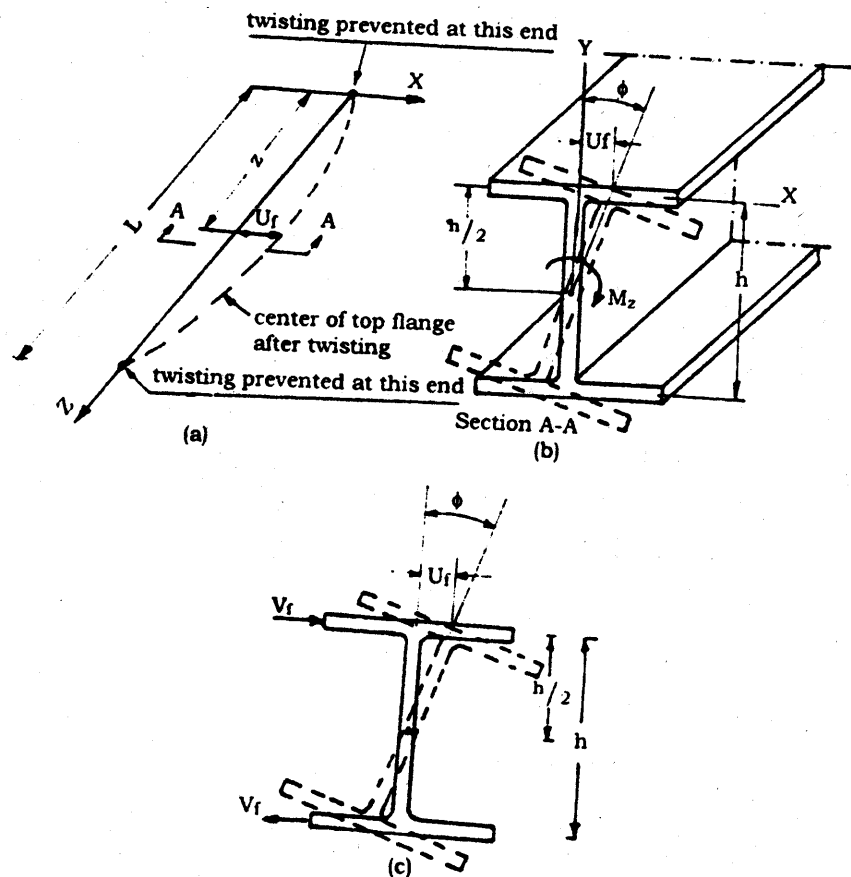
di mana:

- T_{tot} = torsi yang bekerja
- T_1 = komponen torsi yang mengakibatkan geser (torsi murni)

T_2 = komponen torsi yang mengakibatkan warping
 T_1 sudah diketahui persamaannya, yaitu:

$$T_1 = G K \frac{d\phi}{dz} \quad (\text{lihat torsi murni})$$

Sedangkan T_2 dapat ditinjau sebagai berikut:



Gambar 12.1

Gambar 12.1 ini adalah suatu balok I yang terpuntir terhadap sumbu longitudinal z akibat momen torsi $T (= M_z)$. Di sini pada ujung-ujung perletakkannya dicegah agar jangan terjadi twisting

(puntir) tetapi tetap terjadi perpindahan sayap bagian atas sejauh u_f ke samping (arah lateral).

Akibat perpindahan lateral u_f ini, sayap akan melentur dalam bidang xz (lihat Gambar 12.1a) yang mengakibatkan timbulnya gaya geser V_f (lihat Gambar 12.1c).

Dari gambar 12.1b tampak bahwa $\phi = \frac{u_f}{h/2}$ atau $u_f = \frac{\phi h}{2}$

$$u_f = \frac{\phi h}{2}$$

$$M_f = -E I_f \frac{d^2 u_f}{dz^2}$$

di mana:

M_f = momen lentur lateral pada masing-masing sayap

I_f = momen inersia sayap terhadap sumbu y

Dengan mendiferensialkan $u_f = \frac{\phi h}{2}$ dua kali, kemudian disubstitusikan pada persamaan:

$$M_f = -E I_f \frac{d^2 u}{dz^2}$$

diperoleh:

$$M_f = -E I_f \frac{h}{2} \frac{d^2 \phi}{dz^2}$$

Gaya geser V_f diperoleh dengan mendiferensialkan:

$$M_f = -E I_f \frac{h}{2} \frac{d^2 \phi}{dz^2} \quad \text{satu kali, diperoleh:}$$

$$\text{Gaya melintang } V_f = \frac{dM_f}{dz} = -E I_f \frac{h}{2} \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

T_2 adalah kopel yang ditimbulkan oleh kedua gaya tersebut. Oleh sebab itu diperoleh:

$$T_2 = V_f h = -E I_f \frac{h^2}{2} \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

$$T_2 = -E I_f \frac{h^2}{2} \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (\text{akibat warping})$$

$$T_{\text{tot}} = T_1 + T_2$$

$$T_{\text{tot}} = G K \frac{d\phi}{dz} - E I_f \frac{h^2}{2} \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

atau:

$$T_{\text{tot}} = G K \frac{d\phi}{dz} - E I_w \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

di mana:

$$I_f \approx I_y / 2 \quad \text{dan} \quad I_w \approx \frac{h^2}{4} I_y$$

Untuk penampang yang kekakuan warpingnya sangat kecil, term kedua yaitu $E I_w \frac{d^3 \phi}{dz^3}$ dapat diabaikan sehingga merupakan torsi yang murni, yaitu:

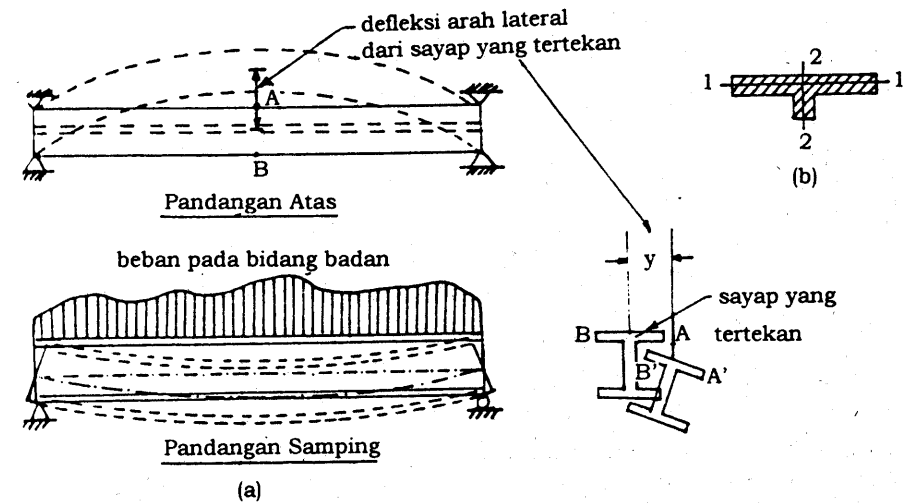
$$T = G K \frac{d\phi}{dz}$$

LATERAL TORSIONAL BUCKLING (KIP)

Ditinjau daerah tekan dari balok yang tidak ditahan arah lateral seperti Gambar 12.2.

Dengan beban pada bidang badan (web), menurut teori titik A dan B adalah menerima tegangan tekan yang sama. Ketidaksempurnaan dari balok dan eksentrisitas yang tak terduga menghasilkan tegangan di A dan B yang tidak sama. Lagipula, adanya residual stresses ikut menunjang terjadinya tegangan-tegangan yang tidak sama melintang lebar sayap pada setiap jarak dari garis netral.

Sayap yang bertampang persegi panjang akan menekuk terhadap sumbu lemahnya (sumbu 1-1 - Lihat Gambar 12.2b). Tetapi badan profil di sini merupakan penunjang yang menerus untuk menghalang-halangi tekuk terhadap sumbu 1-1.



Gambar 12.2: Balok yang ditunjang arah lateral hanya pada ujung-ujungnya

Pada beban tekan yang lebih tinggi, sayap berusaha melekok kemudian terhadap sumbu 2-2. Ini merupakan tekuk yang sekon-yong-konyong terhadap sumbu kuatnya pada arah lateral dan inilah yang disebut *lateral buckling*.

Jika sebuah balok menerima beban yang terus bertambah searah sumbu y (pada bidang badan profil), maka pada suatu saat secara tiba-tiba akan terjadi perpindahan lateral dan torsi pada balok tadi. Kejadian ini dinamakan *lateral torsional buckling (kip)*. Beban pada saat ini dinamakan *beban kritis untuk stabilitas lateral*.

Persamaan diferensial untuk Elastic Lateral Buckling Under Pure Moment.

Gambar 12.3 menunjukkan balok dalam posisi menekuk. Tampak momen yang bekerja M_0 dalam bidang yz akan menghasilkan momen-momen komponen M_x , M_y dan M_z terhadap sumbu-sumbu x' , y' dan z' berturut-turut. Ini berarti ada bending

curvature pada kedua bidang $x'z'$ dan $y'z'$ maupun torsional curvature terhadap sumbu z' .

Dianggap terjadi deformasi yang kecil, maka lentur di bidang $y'z'$ dapat ditulis sebagai berikut (cosinus $\phi = 1$ antara y' dan y , dan antara z' dan z):

$$-EI \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{x'} = M_o \quad (1)$$

di mana v adalah perpindahan pusat berat potongan searah sumbu y (lihat Gambar 12.3b). Juga curvature pada bidang $x'z'$ dapat ditulis:

$$-EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} = M_y = M_o \phi \quad (2)$$

di mana u adalah perpindahan pusat berat potongan searah sumbu x (lihat Gambar 12.3a).

Persamaan diferensial untuk torsi dari profil I sudah diketahui ialah:

$$T_{tot} = GK \frac{d\phi}{dz} - EI_w \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

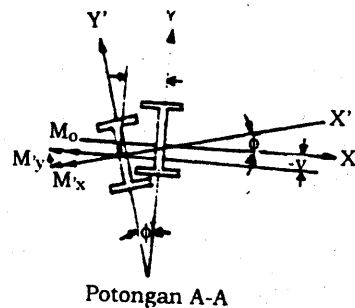
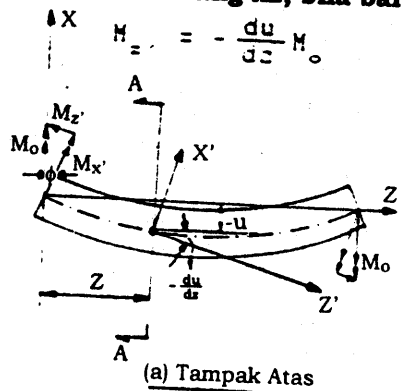
atau ditulis:

$$M_z = GK \frac{d\phi}{dz} - EI_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad (3)$$

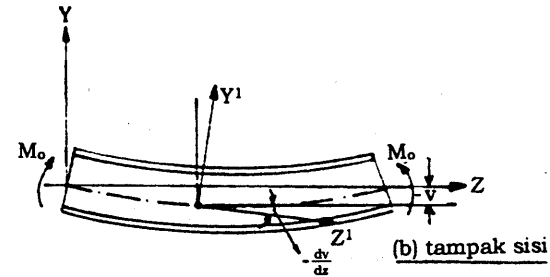
(torsi terhadap sumbu z)

Komponen torsi dari M_o adalah proporsional dengan slope dari balok dalam bidang xz , bila balok sedikit menekuk, maka:

$$M_z = -\frac{du}{dz} M_o \quad (4)$$



(b)



Gambar 12.3: Balok Profil I pada posisi tekuk yang kecil

Dari (3) dan (4) diperoleh:

$$GK \frac{d\phi}{dz} - EI_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} = -\frac{du}{dz} M_o \quad (4)$$

Dua asumsi yang tak dapat dipisahkan pada persamaan (1) dan (2) di mana keduanya berhubungan dengan anggapan dari deformasi yang kecil.

Dapat diterima kemudian, bahwa $I_{x'}$ dan $I_{y'}$ sama dengan I_x dan I_y berturut-turut dan juga I_x adalah besar dibandingkan dengan I_y , demikian hingga persamaan (1) tidak dihubungkan dengan persamaan (2) dan persamaan (5). Jadi displacement v dalam bidang lentur tidak mempengaruhi torsional function ϕ .

Persamaan (2):

$$-EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} = M_o \phi \text{ dapat dirubah menjadi:}$$

$$-\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{M_o \phi}{EI_y} \quad (5)$$

Persamaan (4) dideferensialkan sekali ke z , menjadi:

$$GK \frac{d^2 \phi}{dz^2} - EI_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} = -\frac{d^2 u}{dz^2} M_o \quad (6)$$

Persamaan (2) dan (6) diperoleh:

$$E I_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - G K \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_o^2}{E I_y} \phi = 0 \quad (7)$$

Ini merupakan persamaan diferensial dari angle of twist dengan mengubah:

$$I_w = \frac{h^2}{y} I_y$$

diperoleh hasil persamaan diferensial sebagai berikut:

$$M_o = M_{kip} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_y G K}{L^2} + \left(\frac{\pi^2 E I_y h}{2L^2} \right)^2} \quad (8)$$

Term pertama persamaan (8) menunjukkan kekakuan balok terhadap *lateral buckling*. Term kedua menunjukkan kontribusi warping terhadap torsional resistance.

Pada penampang balok yang kekakuan warpingnya kecil, harga term kedua persamaan (8) akan mendekati 0 sehingga diperoleh:

$$M_{kip} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E I_y G K}$$

(Balok yang penampangnya tidak berubah bentuk)

Sebaliknya jika penampang I terdiri dari pelat-pelat yang tipis maka penampang akan mempunyai kekakuan torsi yang kecil (karena harga K tergantung pada t^3), sehingga term pertama boleh diabaikan, menjadi:

$$M_{kip} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 E I_y h}{2L^2} \right)^2}$$

(Balok yang penampangnya berubah bentuk)

Balok-balok yang Penampangnya Tidak Berubah Bentuk

Menurut PPBBI, balok-balok yang penampangnya tidak berubah bentuk harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\frac{h}{t_b} \leq 75$$

$$\text{dan } \frac{L}{h} \geq 1,25 \frac{b}{t_s}$$

di mana:

h = tinggi balok

b = lebar sayap

t_b = tebal badan

t_s = tebal sayap

L = jarak antara dua titik di mana tepi tertekan dari balok itu ditahan terhadap kemungkinan terjadinya lendutan ke samping.

Tegangan tekan yang terjadi $\leq \sigma_{kip}$ yang diijinkan. Yang dimaksud tegangan tekan di sini ialah tegangan tekan pada tengah-tengah bentang L (L dalam arti L seperti tersebut di atas).

Pada Balok Statis Tertentu

Di sini, pada perletakan pelat badan balok diberi pengaku samping. Tegangan kip yang diijinkan, dihitung dari:

$$(a) \text{ Jika } C_1 \leq 250; \quad \text{maka } \bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma}$$

$$(b) \text{ Jika } 250 < C_1 < C_2 \quad \text{maka } \bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma} - \frac{C_1 - 250}{C_2 - 250} \times 0,3\bar{\sigma}$$

$$(c) \text{ Jika } C_1 \geq C_2 \quad \text{maka } \bar{\sigma}_{kip} = \frac{C}{C_1} \times 0,7\bar{\sigma}$$

di mana :

$$C_1 = \frac{L h}{b t_s}$$

$$C_2 = 0,63 \frac{E}{\sigma}$$

$\bar{\sigma}$ = tegangan dasar menurut tabel 1 PPBBI

Pelat badan balok pada perletakan tidak diberi pengaku samping.

Jika balok-balok statis tertentu di mana pada perletakan pelat badan balok tidak diberi pengaku samping, maka kip yang menentukan adalah $\bar{\sigma}_{kip}$ yang terkecil dari (a), (b) dan (c) dan harus memenuhi:

$$\bar{\sigma}_{kip} \leq 0,042 C_1 C_2 \left(\frac{t_b}{h} \right)^3 \bar{\sigma}$$

Pada balok statis tidak tertentu:

Pelat badan balok pada perletakan diberi pengaku samping

Tegangan kip yang diijinkan dihitung dari:

(a) Jika $C_1 \leq 250$; maka $\bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma}$

(b) Jika $250 < C_1 < C_3$ maka $\bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma} - \frac{C_1 - 250}{C_3 - 250} \times 0,3\bar{\sigma}$

(c) Jika $C_1 \geq C_2$ maka $\bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma} - \frac{C_3}{C_1} \times 0,7\bar{\sigma}$

di mana:

$$C_3 = 0,21 (1 + \beta^*) (3 - 2\beta^*) \frac{E}{\bar{\sigma}}$$

$$\beta^* = \frac{M_{ki} + M_{ka}}{2 M_{jep}}$$

M_{ki} dan M_{ka} adalah momen pada ujung-ujung bagian balok antara pelat-pelat kopel yang berjarak L . M_{jep} adalah momen pada ujung-ujung balok antara pelat-pelat kopel yang berjarak L dengan anggapan bahwa ujung-ujung itu terjepit.

Pelat badan balok pada perletakan tidak diberi pengaku samping

Jika pada balok statis tak tentu di mana pada perletakan, pelat badan balok tidak diberi pengaku samping, maka tegangan kip yang menentukan adalah σ_{kip} yang terkecil dari (a), (b) dan (c) dan harus memenuhi:

$$\bar{\sigma}_{kip} \leq 0,042 C_1 C_2 \left(\frac{t_b}{h} \right)^3 \bar{\sigma}$$

Balok yang Penampangnya Dapat Berubah Bentuk

Pada balok-balok yang tidak memenuhi syarat tersebut di atas, tegangan tekan terbesar pada sayap harus memenuhi:

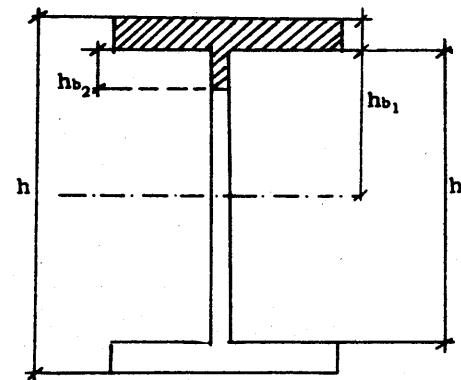
$$\omega \sigma_{tekan \max} \leq \bar{\sigma} \rightarrow \omega \sigma_{tekan \max} = \sigma_{kip}$$

ω adalah angka tekuk menurut tabel 2, 3, 4, 5 PPBBI yang dicari dengan mengambil tekuk sama dengan panjang benteng sayap tertekan yang tidak ditahan terhadap goyangan pada arah tegak lurus badan, dimana harga jari-jari kelembaman = i_y tepi.

i_y tepi = jari-jari kelembaman tepi tertekan terhadap sumbu y-y. Yang dimaksud tepi tertekan adalah sayap dan $\frac{1}{3}$ tinggi badan yang tertekan (untuk penampang simetris menjadi $\frac{1}{6}$ tinggi badan) seperti gambar berikut ini:

Bagian yang diarsir ialah tepi tertekan yang diperhitungkan untuk mencari i_y tepi dengan rumus sebagai berikut:

$$i_y \text{ tepi} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} I_y}{A_1}}$$



A_1 = luas bagian yang diarsir

h_{b1} = tinggi badan yang tertekan

$h_{b2} = \frac{1}{3} h_{b1}$

Karena penampang adalah simetris maka $h_{b2} = \frac{1}{6} h_b$

Catatan untuk β^* pada kip

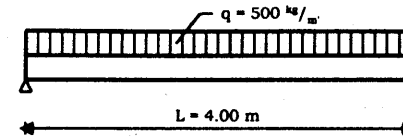
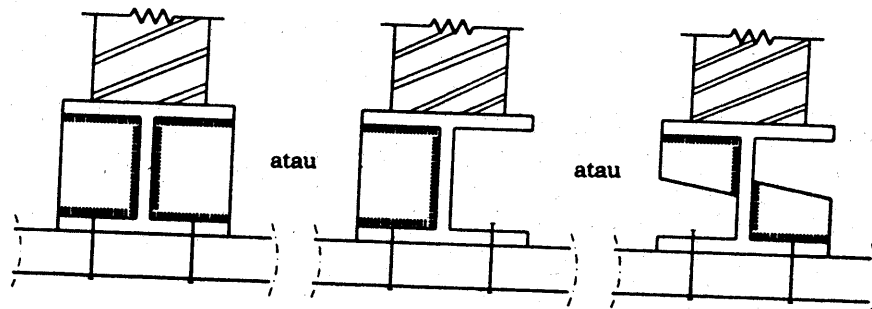
- Akibat momen perletakan yang negatif tegangan kip balok dapat dinaikkan sebesar $(1 + \beta^*)$ kali tegangan kip pada balok yang ujung-ujungnya sendi.
- Bagi rumus-rumus yang mengandung β^* tidak berlaku bagi balok yang momen ujungnya positif. Hal ini kita jumpai pada balok yang diberi penyokong samping di antara perletakannya. Momen di tempat penyokong samping ini sering berharga positif yang mengakibatkan nilai $\beta^* < 0$. Dalam hal demikian dihitung sebagai balok statis tertentu.
- Jika $\beta^* > 1,3$ di mana momen-momen balok sebagian besar bertanda negatif, maka dalam keadaan ini tidak perlu diperhitungkan kipnya, karena stabilitas kip dapat dicegah oleh bebannya.

Contoh 1:

Suatu balok DIN12 memikul beban tembok $q = 500 \text{ kg/m}$, termasuk berat sendiri. Panjang bentang $L = 4,00 \text{ m}$. Balok sebagai simple supported (statis tertentu) dan pada perletakan diberi pengaku pada badannya. Selidikilah kekuatan tegangan balok.

Catatan:

Ada bermacam-macam bentuk perletakan yang diberi pengaku pada badannya sebagai berikut:



$$M_{\max} = \frac{1}{8} \times 5 \times 400^2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{5 \times 400^2}{8 \times 96}$$

$$= 1042 \text{ kg/cm}^2$$

DIN 12 mempunyai:

$$b = 120 \text{ mm}$$

$$h = 120 \text{ mm}$$

$$t_b = 6,5 \text{ mm}$$

$$t_s = 11 \text{ mm}$$

$$W_x = 96 \text{ cm}^3$$

Ditinjau tegangan kip:

$$\frac{h}{t_b} = \frac{120}{6,5} = 18,46 < 75 \quad (\text{OK})$$

$$\frac{L}{h} = \frac{400}{12} = 33,33$$

$$1,25 \frac{b}{t_s} = 1,25 \frac{12}{1,1} = 13,64$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L}{h} = 33,33 > \\ 1,25 \frac{b}{t_s} = 13,64 \quad (\text{OK}) \end{array} \right\}$$

$$1,25 \frac{b}{t_s} = 13,64 \quad (\text{OK})$$

Dari dua ketentuan tersebut menunjukkan bahwa penampang tidak berubah bentuk.

Statis tertentu dengan ujung-ujung perletakan badannya diberi pengaku:

$$C_1 = \frac{L h}{b t_s} = \frac{400 \times 12}{12 \times 1,1} = 363,6 > 250 \quad (\text{tidak memenuhi})$$

$$C_2 = 0,63 \frac{E}{\sigma} = 0,63 \times \frac{2,1 \times 10^6}{1600} = 826,875$$

Tampak:

$$250 < C_1 = 363,6 < C_2 = 826,875 \quad \text{maka dipakai}$$

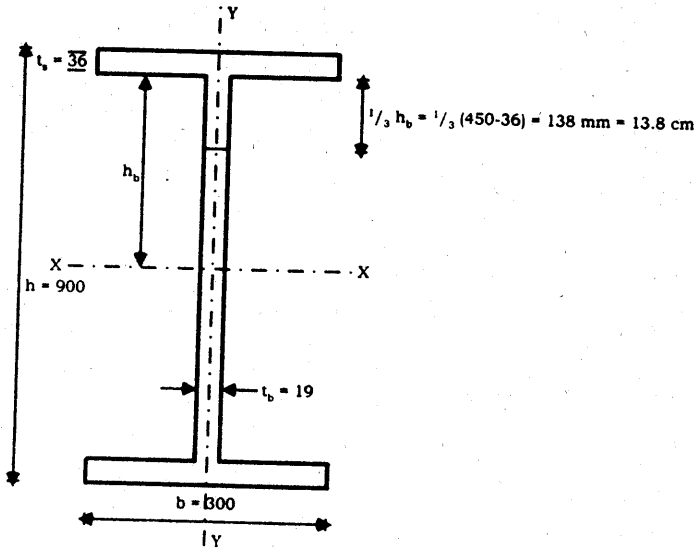
$$\bar{\sigma}_{\text{kip}} = \bar{\sigma} - \frac{C_1 - 250}{C_2 - 250} \times 0,3 \bar{\sigma}$$

$$= 1600 - \frac{363,6 - 250}{826,875 - 250} \times 0,3 \times 1600 = 1504 \text{ kg/cm}^2$$

$$> 1042 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Contoh 2:

Suatu balok DIN 90 memikul beban kolom $P = 150 \text{ t}$ di tengah-tengah bentang. Panjang bentang $L = 4,00 \text{ m}$ sebagai statis tertentu. Selidikilah tegangan dari balok.



$$\frac{h}{t_b} = \frac{900}{19} = 47,4 < 75 \quad (\text{OK})$$

$$\frac{L}{n} = \frac{400}{90} = 4,44$$

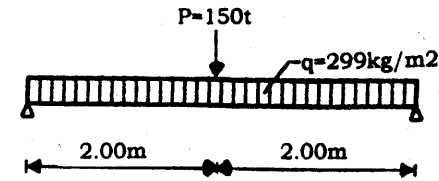
$$1,25 \frac{b}{t_s} = 1,25 \frac{300}{36} = 10,42$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L}{n} = 4,44 \\ 1,25 \frac{b}{t_s} = 10,42 \end{array} \right\} \frac{L}{h} < 1,25 \frac{b}{t_s}$$

Berarti di sini terjadi perubahan bentuk penampang. DIN 90 mempunyai:

$$W_x = 11250 \text{ cm}^3 \quad I_y = 16270 \text{ cm}^4$$

$$\text{berat} = 299 \text{ kg/m}$$



$$M_p = \frac{1}{4} \times 150 \times 4 = 150 \text{ tm} = 15000000 \text{ kg cm}$$

$$M_q = \frac{1}{8} \times 2,99 \times 400^2 = 52325 \text{ kg cm}$$

$$M_{\max} = 15052325 \text{ kg cm}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{15052325}{11250} = 1338 \text{ kg/cm}^2$$

$$i_{y \text{ tepi}} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{I_y}{A'}}$$

$$A' = 3,6 \times 30 + 13,8 \times 1,9 = 134,22 \text{ cm}^2$$

$$\frac{1}{2} I_y = \frac{1}{2} \times 16270 = 8135 \text{ cm}^4$$

$$i_{y \text{ tepi}} = \sqrt{\frac{8135}{134,22}} = 7,78$$

$$L \text{ tekuk} = L \text{ 400 cm}$$

$$\lambda = \frac{L_k}{i_{y \text{ tepi}}} = \frac{400}{7,78} = 51,4 \rightarrow \omega = 1,248$$

$$\omega \sigma_{\text{tek max}} = 1,248 \times 1338 = 1670 \text{ kg/cm}^2$$

$$> 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{tidak memenuhi})$$

Diberi bracing di tengah-tengah sehingga L menjadi = 2,00 m.

Penampang berubah bentuk:

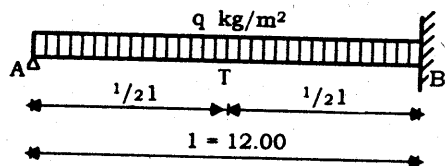
$$\lambda = \frac{200}{7,78} = 25,7 \rightarrow \omega = 1,036$$

$$\omega \sigma_{\text{tek max}} = 1,036 \times 1338 = 1386 \text{ kg/cm}^2$$

$$< \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Contoh 3:

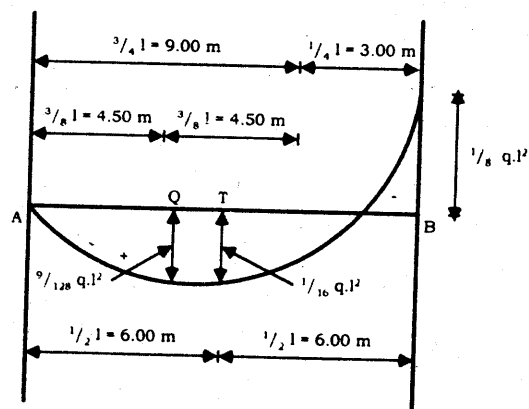
Suatu balok IPE 600 diletakkan pada perletakan A sebagai sendi dan di B sebagai jepitan. Pada ujung-ujung balok, badannya diberi pengaku samping. Kontrol stabilitas terhadap kip.



Dari profil IPE 600 diketahui:

$$\begin{aligned} h &= 600 \text{ mm} & i_y &= 46,6 \text{ mm} = 4,66 \text{ cm} \\ b &= 220 \text{ mm} & I_y &= 3387 \times 10^4 \text{ mm}^4 = 3387 \text{ cm}^4 \\ t_b &= 12 \text{ mm} & W_x &= 3070 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 3070 \text{ cm}^3 \\ t_s &= 19 \text{ mm} \end{aligned}$$

Gambar bidang momen balok AB sebagai berikut:



Dalam meninjau balok terhadap lentur diambil M yang terbesar
 $M_{\text{max}} = \frac{1}{8} q l^2$

$$\bar{\sigma} = \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{1/8 q l^2}{W_x}$$

$$q_{\text{max}} = \frac{8 \bar{\sigma} W_x}{l^2} = \frac{8 \times 1600 \times 3070}{1200^2} = 27,29 \text{ kg/cm}^2$$

Ditinjau pengaruh kip:

$$\frac{h}{t_b} = \frac{600}{12} = 50 < 75$$

$$\frac{L}{h} = \frac{12000}{600} = 20$$

$$1,25 \frac{b}{t_s} = 1,25 \times \frac{220}{19} = 14,47$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{h} &> 1,25 \frac{b}{t_s} \end{aligned} \right\}$$

Di sini berarti penampang tidak berubah bentuk.

$$C_1 = \frac{L h}{b t_s} = \frac{12000 \times 600}{220 \times 19} = 1722 > 250$$

$$\beta^* = \frac{M_{ki} + M_{ka}}{2 M_{jep}} = \frac{0 - \frac{1}{8} q l^2}{-2 \times \frac{1}{12} q l^2} = 0,75$$

$$\begin{aligned} C_3 &= 0,21 (1 + \beta^*) (3 - 2\beta^*) \frac{E}{\bar{\sigma}} \\ &= 0,21 (1 + 0,75) (3 - 2 \times 0,75) \frac{2100000}{1600} \\ &= 0,21 \times 1,75 \times 1,5 \frac{21000}{16} = 723,5 \end{aligned}$$

$$C_1 = 1722$$

$$C_3 = 723,5$$

$C_1 > C_3 \rightarrow$ dipakai rumus

$$\bar{\sigma}_{\text{kip}} = \frac{C_3}{C_1} \times 0,75 \bar{\sigma}$$

$$\bar{\sigma}_{kip} = \frac{723,5}{1722} \times 0,7 \times 1600 = 470,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{9}{128} q_{max} l^2}{W_x} = \frac{\frac{9}{128} \times 27,29 \times 1200^2}{3070}$$

$$= 900 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{max} > \bar{\sigma}_{kip} \text{ perlu diberi bracing}$$

Misalnya diberi bracing di tengah-tengah (di T), berarti
 $l = \frac{1}{2} \times 12 \text{ m} = 6,00 \text{ m}$

Ditinjau bagian kiri:

$$l = 600 \text{ cm}$$

$$\frac{h}{t_b} = 50 < 75$$

$$\frac{L}{h} = \frac{6000}{600} = 10$$

$$1,25 \frac{b}{t_s} = 1,25 \times \frac{220}{19} = 14,47$$

$$\frac{L}{h} < 1,25 \frac{b}{t_s}$$

Berarti penampang berubah bentuk.

Maka dipakai

$$\omega \sigma_{tekan \text{ max}} \leq \bar{\sigma}$$

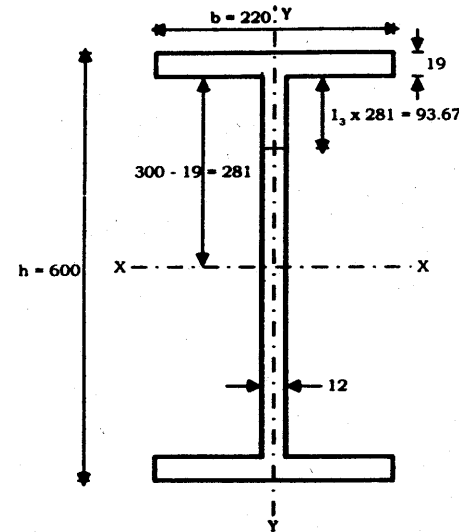
$$i_y \text{ tepi} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} I_y}{A'}}$$

$$\frac{1}{2} I_y = \frac{1}{2} \times 3387$$

$$= 1693,5 \text{ cm}^4$$

$$A' = 1,9 \times 22 + 1,2 \times 9,367$$

$$= 53 \text{ cm}^2$$



$$i_y \text{ tepi} = \sqrt{\frac{1693,5}{53}}$$

$$= 5,65$$

l_k = panjang bagian sayap tertekan yang tidak ditahan dari samping.

$$l_k = 600 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{L_k}{i_y \text{ tepi}} = \frac{600}{5,65} = 106,2$$

$$\sigma_{tek \text{ max}} = 900 \text{ kg/cm}^2$$

$$\omega \sigma_{tek \text{ max}} = 2,19 \times 900 = 1971 \text{ kg/cm}^2 > 1600 \text{ kg/cm}^2$$

(tidak memenuhi)

Dicoba meletakkan bracing di $\frac{1}{4} l$ dari perletakan A, maka 1 menjadi

$$= \frac{1}{4} \times 12 = 3,00 \text{ m} = 300 \text{ cm}$$

$$i_y \text{ tepi} = 5,65 \text{ cm}$$

$$l_k = 300 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{300}{5,65} = 53 \rightarrow \omega = 1,264$$

$$\omega \sigma_{tek \text{ max}} = 1,264 \times 900 = 1137,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$< \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

Kontrol bagian kanan (TB) dengan panjang $l = 6,00$ m:

$$\beta^* = \frac{-\frac{1}{8} ql^2 + \frac{1}{16} ql^2}{-2 \times \frac{1}{12} q\left(\frac{1}{2}l\right)^2} = 1,5 > 1,3$$

Tidak perlu pengontrolan terhadap kip.

-ooOoo-

BAB

XIII

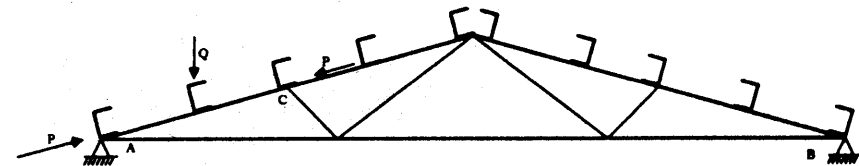
BEAM COLUMN

Bila suatu batang harus memikul gaya tekan aksial dan momen lentur bersama-sama, maka batang tersebut disebut *beam column*.

Batang merupakan balok (*beam*) karena memikul momen dan berupa kolom (*column*) karena memikul gaya tekan aksial, sehingga batang berfungsi ganda, baik sebagai kolom maupun sebagai balok, karenanya disebut *beam column*.

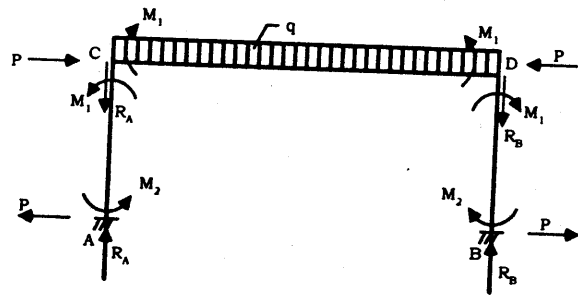
Pada bangunan, banyak dijumpai keadaan batang semacam ini, misalnya:

1. Batang tepi alas suatu rangka atap, di mana penempatan gordingnya tidak tepat pada satu titik simpul.



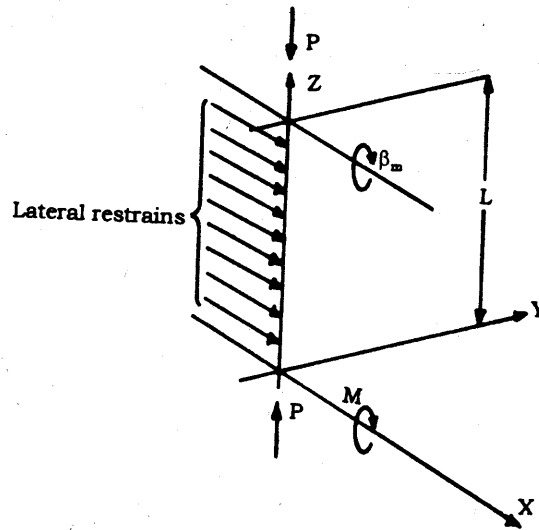
Batang tepi AC sebagai batang tekan memikul gaya tekan P dan momen akibat gaya Q yang bekerja di gording yang terletak di tengah-tengah antara A dan C.

2. Kolom dan Balok dari Suatu Portal
Balok CD memikul gaya tekan P dan momen M, dan gaya lintang q. Kolom AC dan BD memikul gaya tekan R_A atau R_B dan momen lentur M₁ dan M₂.

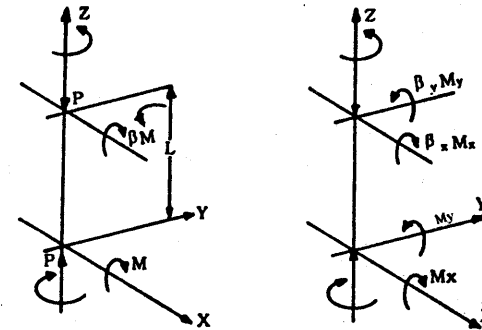


Peninjauan beam column dapat dalam keadaan bermacam-macam, antara lain:

- a. Kekakuan kolom dalam bidang zx, melekuk dalam bidang yz saja, karena ada lateral restraints ⊥ bidang yz.

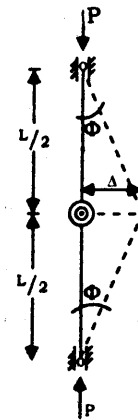


- b. Flexural-torsional buckling dari kolom melentur dalam bidang yz, dan melekuk dalam bidang xz dan twisting φ.



- c. Biaxial bending column, melentur dalam bidang yz dan xz dan twisting φ.

Ditinjau batang yang mengalami tekuk (buckling)
Tekuk ditinjau sebagai berikut:



Percobaan sebuah model dari kolom yang ideal. Terdiri dari 2 batang yang amat kaku, yang disambung di tengah-tengah dengan pin (sendi) dan diberi pir (spring) yang dapat berputar.

$$K = \frac{M}{\theta}$$

disebut spring constant
(M = K θ)

Setelah gaya P bekerja, pada suatu model kolom akan menekuk dan terjadi lendutan di tengah-tengah sebesar Δ dan pir (spring) mengalami rotasi sebesar 2θ, sehingga momen pada spring adalah:

$$M_s = K 2\theta$$

$$\theta = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}L}$$

$$M_s = K 2 \frac{\Delta}{\frac{1}{2}L} = 4 k \frac{\Delta}{L}$$

$$M_s = 4 k \frac{\Delta}{L}$$

M_s ini merupakan momen dalam

Momen luar yang bekerja: $M_p = P \Delta$

Dalam keadaan setimbang:

$$M_s = M_p$$

$$4 k \frac{\Delta}{L} = P \Delta \rightarrow P = \frac{4K}{L}$$

harga ini adalah $P_{cr} = P$ kritis

Jadi harga kritis dari gaya P : $P_{cr} = \frac{4K}{L}$

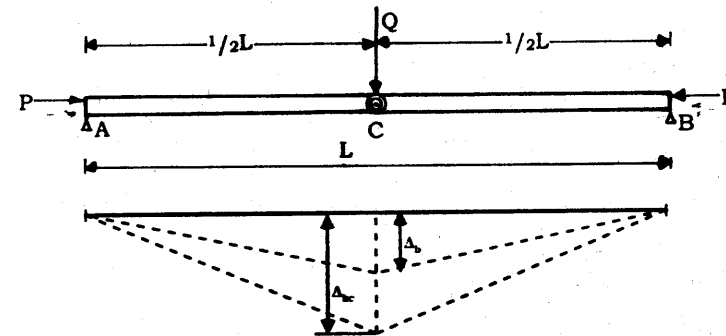
Jika tegangan kritis yang terjadi lebih kecil daripada proporsional limit (σ_p) maka harga P_{cr} disebut *Elastic Buckling Load* (beban tekuk elastis) yang besarnya ialah:

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \left. \begin{array}{l} i = \sqrt{\frac{I}{A}}, i^2 = \frac{I}{A}, I = i^2 A \end{array} \right\} P_e = \frac{\pi^2 E i^2 A}{(kl)^2}$$

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 E i^2 A}{(kl)^2 A} = \frac{\pi^2 E i^2}{(kl)^2} \left. \begin{array}{l} i^2 = \frac{kL}{\lambda} \end{array} \right\} \sigma_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$$\sigma_e = \sigma_{cr} \quad \text{maka} \quad \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Pengaruh lendutan pada momen awal



Gambar 3.1

Suatu balok AB yang terdiri dari 2 bagian batang yang kaku sekali dihubungkan di tengah-tengah bentang dengan sendi dan pir. Balok AB dibebani gaya tekan aksial P dan di tengah-tengah bentang dibebani gaya terpusat Q .

Maka akibat beban Q saja, tanpa adanya P , akan timbul lendutan sebesar Δ_b , dan akibat gaya Q dan beban tekan aksial P (yang bekerja bersamaan) akan terjadi lendutan sebesar Δ_{bc} (lihat Gambar 3.1).

Kalau pada spring di tengah-tengah mempunyai spring constant = K dan terjadi momen pada spring sebesar M_s , maka:

$$M_s = 4 k \frac{\Delta}{L} \rightarrow \Delta = \frac{M_s L}{4 K}$$

di mana Δ adalah lendutan di tengah-tengah

Ditinjau dulu P tidak ada, yang ada hanya Q saja

Di tengah-tengah timbul $M_b = \frac{1}{4} Q L$ (disebut momen awal). Momen awal = momen spring, sehingga:

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \frac{M_s L}{4 K} \rightarrow \Delta_b = \frac{M_b L}{4 K} \\ M_b &= \frac{1}{4} Q L \end{aligned} \right\} \Delta_b = \frac{Q L^2}{16 K}$$

Ditinjau kemudian P dan Q bekerja bersama-sama:

Pada tempat spring ada tambahan momen lagi akibat P , sehingga terjadi momen terakhir sebesar:

$$M_{bc} = \frac{1}{4} Q L + P \Delta_{bc}$$

dan lendutan sebesar:

$$\Delta_{bc} = \frac{M_{bc} L}{4 K}$$

$$M_{bc} = M_s \quad \text{sehingga:} \quad \Delta_{bc} = \frac{M_s L}{4 K}$$

Dari:

$$M_{bc} = \frac{1}{4} Q L + P \Delta_{bc}$$

dan

$$\Delta_{bc} = \frac{M_{bc} L}{4 K}$$

$$\Delta_{bc} = \left(\frac{1}{4} Q L + P \Delta_{bc} \right) \times \frac{L}{4 K}$$

$$\Delta_{bc} = \frac{Q L^2}{16 K} + \frac{P L \Delta_{bc}}{4 K}$$

$$\Delta_{bc} - \frac{P L \Delta_{bc}}{4 K} = \frac{Q L^2}{16 K} \rightarrow \Delta_{bc} \left(1 - \frac{P L}{4 K} \right) = \frac{Q L^2}{16 K}$$

$$\Delta_{bc} \left(1 - \frac{P L}{4 K} \right) = \Delta_b \quad \Delta_{bc} = \frac{\Delta_b}{1 - \frac{P L}{4 K}}$$

$$P = P_{cr} = P_e = \frac{4 K}{L}$$

maka:

$$\Delta_{bc} = \Delta_b \frac{1}{1 - \frac{P}{P_e}}$$

Faktor $\frac{1}{1 - \frac{P}{P_e}}$ disebut magnification factor

$$\Delta_b = \frac{M_b L}{4 K} = M_b \left(\frac{L}{4 K} \right)$$

$$\Delta_{bc} = \frac{M_{bc} L}{4 K} = M_{bc} \left(\frac{L}{4 K} \right)$$

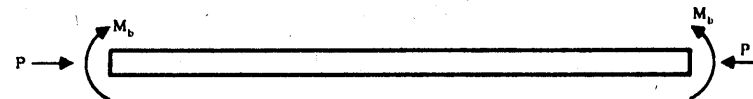
maka:

$$\Delta_{bc} = \Delta_b \frac{1}{1 - \frac{P}{P_e}} \quad \text{menjadi} \quad M_{bc} = M_b \frac{1}{1 - \frac{P}{P_e}}$$

Jika $\frac{P_e}{P} = n$, maka rumus menjadi

$$M_{bc} = M_b \left(\frac{n}{n-1} \right)$$

Terbukti bentuk rumus ini menurut W.F. Chen dan T. Assuta berlaku juga untuk batang yang ujung-ujungnya memikul momen sebagai berikut:



Apabila sepanjang batang bekerja juga beban melintang, rumus inipun ternyata masih sesuai.

Ditinjau batang yang memikul momen di ujung-ujungnya dan memikul gaya tekan aksial sebagai berikut:

Jika gaya aksial F dan momen M bekerja pada suatu penampang batang, asalkan tegangan-tegangan yang timbul tidak melebihi tegangan leleh, maka pengaruh F dan M ini dapat dihitung menurut rumus-rumus $\sigma = \frac{F}{A}$ dan $\sigma = \frac{Mz}{I}$. Jadi untuk suatu titik pada penampang yang berjarak z terhadap garis netral, tegangannya adalah:

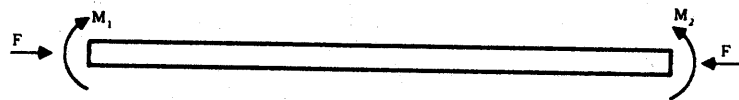
$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{Mz}{I}$$

Tegangan maksimumnya menjadi:

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}$$

dengan memasukkan pengaruh tekuk, rumus menjadi:

$$\sigma_{\max} = \frac{\omega F}{A} + \frac{M}{W}$$



$$|M_2| > |M_1|$$

Momen maksimum, secara sederhana dapat ditulis:

$$M_{\max} = \beta \frac{n}{n-1} M_2$$

M_2 = momen yang terbesar, selanjutnya yang dimaksud dengan M_x ialah = M_2

Maka persyaratan tegangannya kini dapat ditulis:

$$\sigma_{\max} = \frac{\omega_x F}{A} + \beta_x \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x}$$

Pada ujung-ujung kolom, beban-beban yang bekerja harus memenuhi syarat:

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} + \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Kontrol terhadap tekuk ke arah tegak lurus sumbu lemah y :

$$\omega_y \frac{F}{A} \leq \bar{\sigma}$$

Pengaruh beban lintang:

Dengan adanya beban lintang, persyaratan tegangan menjadi:

$$\frac{\omega_x F}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{|\beta_x M_{x2} + M_{Dx}|}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

di mana M_{Dx} adalah momen lentur lapangan terbesar akibat beban lintang yang \perp sumbu x , dengan anggapan kedua ujung kolom sebagai sendi.

Apabila $|M_{Dx}| \leq |2M_{x2}|$ pada persamaan di atas $M_{Dx} = 0$ (M_{Dx} tidak diperhitungkan).

Menurut Massomet besarnya $\beta = 0,6 + 0,4 \frac{M_{x1}}{M_{x2}}$

β_x harus $\geq 0,4$, jika panjang tekuk pada arah tegak lurus sumbu x , diperoleh dengan mengambil bagian terpanjang yang tidak disokong pada arah \perp sumbu x .

β_x harus $\geq 0,6$, jika panjang tekuk pada arah \perp sumbu x , diperoleh dengan mengambil panjang tekuk yang sebenarnya, dengan memperhitungkan syarat-syarat batas ujung-ujung kolom.

W_x adalah momen tahanan terhadap sumbu x .

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \frac{P_e}{P} = \frac{\pi^2 E i^2 A}{(kL)^2 P} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2 P} \\ \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} &= \sigma_e \end{aligned} \right\} \begin{aligned} n_x &= \frac{\sigma_e A}{P} \\ \sigma_e &= \sigma_{EX} \end{aligned}$$

(Lihat tabel 10 PPBBI), dan $P = F$ sesuai rumus diatas.

maka:

$$n_x = \frac{A \sigma_{EX}}{F}$$

di mana:

F = gaya normal pada kolom

A = luas tampang kolom

σ_{EX} = tegangan elastis dengan sumbu x sebagai garis netral

$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x}$ = kelangsingan terhadap sumbu x. Dengan

diketahuinya besarnya λ_x yang dapat dicari pada tabel 2, 3, 4, 5 PPBBI besarnya faktor tekuk ω_x

Harga $\bar{\sigma}_{EX}$ dapat dicari di tabel 10 PPBBI sesuai dengannya

Persamaan-persamaan tersebut di atas adalah dengan anggapan bahwa kedua ujung kolom tidak bergeser satu terhadap yang lain. Keadaan ini disebut dalam PPBBI:

kolom-kolom yang ujung-ujungnya tidak bergoyang.

Konkritnya, rumus-rumus untuk kolom yang ujung-ujungnya tidak bergoyang adalah sebagai berikut:

(1) Kolom-kolom yang tidak dibebani gaya-gaya lintang dan momen lentur hanya terhadap sumbu x, harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \beta_x \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x} \leq \bar{\sigma}$$

$$\omega_y \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

N di sini = F uraian di atas = gaya normal

(2) Kolom-kolom yang dibebani gaya-gaya lintang dan momen lentur hanya terhadap sumbu x, harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \beta_x \frac{n_x |\beta_x M_{x2} + M_{Dx}|}{n_x - 1 W_x} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{|M_{x2} + M_{Dx}|}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

(3) Kolom-kolom yang tidak dibebani gaya lintang dan lentur hanya terhadap sumbu y, harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\omega_y \frac{N}{A} + \beta_y \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$\omega_x \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

(4) Kolom-kolom yang dibebani gaya lintang dan lentur hanya terhadap sumbu y, harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

$$\omega_y \frac{N}{A} + \frac{n_y |\beta_y M_{y2} + M_{Dy}|}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{N}{A} + \frac{|M_{y2} + M_{Dy}|}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

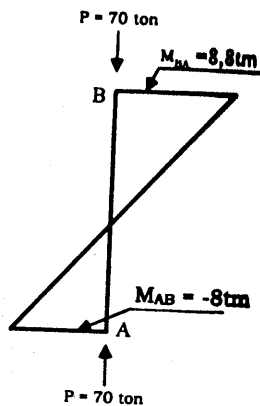
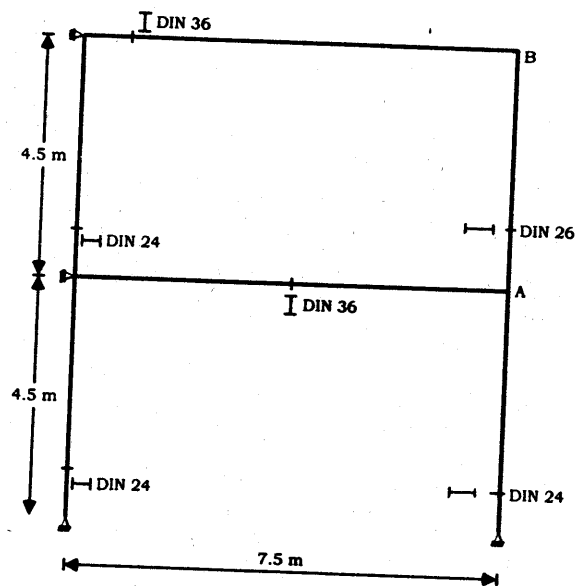
Contoh:

Portal yang tidak bergoyang seperti tergambar. Kolom AB memikul gaya aksial $P = 70$ ton dan $M_{BA} = +8,8$ ton meter. $M_{AB} = -8$ tm.

Tegak lurus sumbu lemah (sumbu y) dari kolom DIN 24 diberi lateral restraints yang membagi panjang kolom AB = 4,5 m menjadi 5 bagian yang sama panjang.

$$\bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2$$

Ditanyakan apakah kolom AB cukup kuat!



Jawab:

Dicari dulu panjang tekuk kolom AB

Panjang tekuk dapat dicari dengan 2 cara:

- Panjang tekuk = panjang kolom = 4,5 m
- Panjang tekuk yang sebenarnya

Panjang tekuk yang sebenarnya:

$$I_x \text{ dari DIN 36} = 45120 \text{ cm}^4 \text{ (beam)}$$

$$I_x \text{ dari DIN 24} = 11690 \text{ cm}^4 \text{ (kolom)}$$

$$G_A = \frac{\sum I_c / L_c}{\sum I_b / L_b} = \frac{2 (11690 / 4,5)}{45120 / 7,5} = 0,86$$

$$G_B = \frac{\sum I_c / L_c}{\sum I_b / L_b} = \frac{11690 / 4,5}{45120 / 7,5} = 0,43$$

$$k = 0,715$$

$$\text{Panjang tekuk } L_k = k L = 0,715 \times 4,5 = 3,22 \text{ m}$$

$$P = 70 \text{ ton}; M_{BA} > M_{AB}, \text{ dipakai } M_{BA} = 8,8 \text{ tm}$$

$$\beta_x = 0,6 + 0,4 \frac{-8}{8,8} = 0,24$$

$$\text{Untuk panjang tekuk} = 4,5 \text{ m} \rightarrow \beta_x < 0,4$$

$$\text{dipakai } \beta_x = 0,4$$

$$\text{Untuk panjang tekuk} = 3,22 \text{ m} \rightarrow \beta_x < 0,6$$

$$\text{dipakai } \beta_x = 0,6$$

Kolom AB, DIN 24 mempunyai $i_x = 10,2 \text{ cm}$

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x} = \frac{450}{10,2} = 44$$

$$\omega_x = 1,178$$

atau

$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x} = \frac{322}{10,2} = 31,57$$

$$\omega_x = 1,78$$

Luas tampang kolom : $A = 111 \text{ cm}^2$

$$n_x = \frac{A}{N} \sigma_{EX}$$

$$\text{Untuk } \lambda_x = 44 \rightarrow \sigma_{EX} = 10,706 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Untuk } \lambda_x = 31,57 \rightarrow \sigma_{EX} = 20,904 \text{ kg/cm}^2$$

$$n_x = \frac{111}{70000} \times 10,706 = 16,98$$

untuk panjang tekuk = 4,5 m

$$n_x = \frac{111}{70000} \times 20,904 = 33,15$$

untuk panjang tekuk = 3,22 m

Untuk panjang tekuk = 4,5 m:

$$\begin{aligned}\omega_x \frac{N}{A} + \beta_x \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \\ = 1,178 \frac{70000}{111} + 0,4 \frac{16,98}{16,98 - 1} \frac{880000}{974} \\ = 742,89 + 576,02 \\ = 1115,5 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Untuk panjang tekuk = 3,22 m:

$$\begin{aligned}1,178 \frac{70000}{111} + 0,4 \frac{33,15}{33,15 - 1} \frac{880000}{974} \\ = 742,89 + 372,64 \\ = 1115,5 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Kontrol pada ujung-ujung kolom:

$$\begin{aligned}\frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = \frac{70000}{116} + \frac{880000}{1060} = 603,45 + 830,19 \\ = 1433,64 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Kontrol terhadap sumbu y (sumbu lemah):

Panjang kolom 4,5 m dibagi menjadi 5 bagian oleh lateral restraints, sehingga panjang masing-masing bagian: $\frac{1}{5} \times 450 = 90 \text{ cm}$

Panjang tekuk = 90 cm

$$\lambda_y = \frac{L_k}{i_y} = \frac{90}{6,4} = 14,06 \rightarrow \omega_y = 1 \quad (\lambda \leq 20 \text{ berarti } \omega = 1)$$

$$\begin{aligned}\omega_y \frac{N}{A} = 1 \times \frac{70000}{116} = 603,45 \text{ kg/cm}^2 \\ < \bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}\end{aligned}$$

Kolom yang mengalami Flexural-Torsional Buckling

Kolom semacam ini melentur terhadap sumbu kuatnya dan melekuk arah lateral (terhadap sumbu lemahnya) lalu terjadi puntir.

Menurut PPBBI, pengaruh lateral torsional buckling ini diperhitungkan dengan mengalikan faktor θ pada term kedua rumus:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \beta_x \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

sehingga menjadi:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \theta \beta_x \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Apabila beam column juga menerima beban lintang, berlaku rumus:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{|\beta_x M_{x2} + M_{Dx}|}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

di mana:

$$\theta = \frac{5 \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{kip} \left(8 - 3 \frac{M_{x1}}{M_{x2}} \right)} \geq 1,0$$

$\bar{\sigma}_{kip}$ untuk konstruksi statis tertentu dihitung dengan persamaan (35a), (35b) dan (35c) PPBBI

$\bar{\sigma}_{kip}$ untuk konstruksi statis tidak tertentu dihitung dengan persamaan (37a), (37b) dan (37c)

Kolom yang mengalami Biaxial Bending

Kolom semacam ini melentur baik terhadap sumbu kuatnya maupun terhadap sumbu lemahnya dan disertai adanya puntir.

Bentuk geometris dari portal bangunan dan pembebanannya, umumnya bersifat tiga dimensi, sehingga kolom yang merupakan elemen struktur tersebut akan memikul beban-beban aksial, lentur dan puntir akibat elemen-elemen lainnya yang dihubungkan dengan kolom tersebut.

Biasanya pembebanan terhadap elemen bangunan ini dibuat sedemikian rupa, agar beban-beban yang bekerja hanya menimbulkan lentur terhadap sumbu kuatnya saja. Tetapi lentur terhadap sumbu lemah batang sering tidak dapat dicegah dan cukup besar pengaruhnya sehingga tidak boleh diabaikan. Selain itu, akibat adanya gaya aksial tekan pada kolom akan memperbesar deformasi, baik terhadap sumbu kuatnya maupun terhadap sumbu lemahnya.

Analisis terhadap batang yang memikul aksial dan lentur pada kedua sumbu utamanya adalah sukar sekali.

Namun dengan menggunakan rumus yang tercantum dalam PPBBI hasilnya cukup realistis.

Menurut PPBBI kolom yang mengalami biaxial bending tanpa adanya beban lintang adalah sebagai berikut:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + \theta \beta_x \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} + \beta_y \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Pada ujung batang harus dikontrol dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Untuk beam column yang menerima beban lintang:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{|\beta_x M_{x2} + M_{DX}|}{W_x} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{|\beta_y M_{y2} + M_{Dy}|}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

dan

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{|M_{x2} + M_{DX}|}{W_x} + \frac{|M_{y2} + M_{Dy}|}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

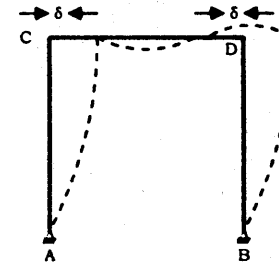
Catatan:

ω_{\max} diambil yang terbesar dari ω_x dan ω_y .

Beam-column pada portal bergoyang

Persamaan yang terdapat di depan yang didasarkan atas anggapan bahwa kedua ujung batang tidak bergeser satu terhadap yang lain.

Pada keadaan portal bergoyang, ujung kolom yang satu akan bergeser terhadap ujung kolom yang lain seperti gambar di bawah ini:

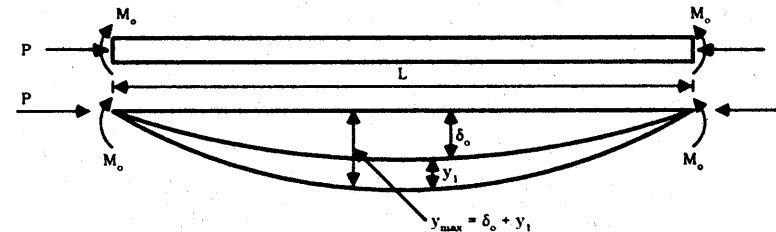


Kolom AC → ujung C bergeser terhadap ujung A

Kolom BD → ujung D bergeser terhadap ujung B

Dalam keadaan kolom yang ujungnya bergoyang dapat ditinjau sebagai berikut:

Pada keadaan ujung-ujung batang tidak bergeser:



Telah diketahui di depan bahwa:

$$\Delta_{bc} = \Delta_b \left(\frac{n}{n-1} \right)$$

di mana $\Delta_{bc} = y_{\max} = \delta_o + y_1$

$$\Delta_b = \delta_o$$

sehingga:

$$y_{\max} = \delta_o + y_1 = \delta_o \left(\frac{n}{n-1} \right)$$

Akibat adanya deformasi y_{\max} , maka akibat P timbul momen tambahan sebesar $P y_{\max}$, sehingga M_{\max} yang terjadi:

$$M_{\max} = M_o + P y_{\max}$$

$$\frac{P_e}{P} = n \rightarrow P = \frac{P_e}{n}$$

$$M_{\max} = M_o + \frac{P_e}{n} \frac{n}{n-1} \delta_o$$

$$= M_o + \delta_o \frac{P_e}{n-1}$$

$$= M_o + \frac{\delta_o \pi^2 EI}{n-1 L^2}$$

$$= M_o \left(1 + \frac{\delta_o \pi^2 EI}{n-1 M_o L^2} \right)$$

$$= M_o \left(\frac{n-1}{n-1} n + \frac{n}{n-1} \delta_o \frac{\pi^2 EI}{M_o L^2} \right) \frac{1}{n}$$

$$= M_o \frac{n}{n-1} \left(\frac{n-1}{n} n + \frac{\delta_o \pi^2 EI}{n M_o L^2} \right)$$

$$= M_o \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{1}{n} + \frac{\delta_o \pi^2 EI}{n M_o L^2} \right)$$

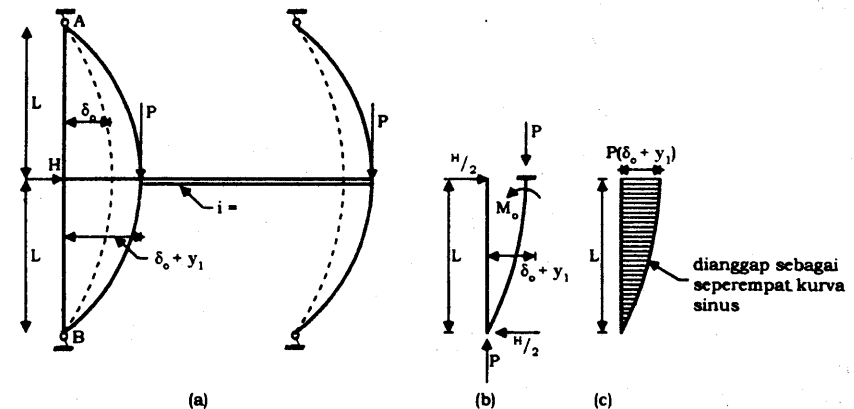
$$= M_o \frac{n}{n-1} \left(1 + \left(\delta_o \frac{\pi^2 EI}{M_o L^2} - 1 \right) \frac{1}{n} \right)$$

$$M_{\max} = M_o \frac{n}{n-1} \beta$$

di mana:

$$\beta = 1 + \left(\delta_o \frac{\pi^2 EI}{M_o L^2} - 1 \right) \frac{1}{n} \quad (1)$$

Pada kolom bergoyang dengan beban M dan P dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Apapun juga keadaan tahanan pada titik-titik A dan B dari batang, maka kurva lendutan dan kemudian momen sekunder yaitu $P(\delta_o + y_1)$, dapat ditinjau sebagai kurva sinus dengan panjang batang = $2L$.

Berdasarkan analisis di atas tadi, untuk panjang batang = L diperoleh:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\delta_o \pi^2 EI}{M_o L^2} - 1 \right) \frac{1}{n}$$

Maka untuk panjang batang $2L$ diperoleh harga β sebagai berikut:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\delta_o \pi^2 EI}{4 M_o L^2} - 1 \right) \frac{1}{n} \quad (2)$$

Akibat M_o diperoleh deformasi δ_o

$$M = \frac{3 EI \delta_o}{L^2}$$

Sedangkan M_o lihat freebody gambar b adalah:

$$M_o = \frac{H}{2} L$$

$$\left. \begin{aligned} M_o &= \frac{3 EI \delta_o}{L^2} \\ M_o &= \frac{H}{2} L \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{H}{2} L &= \frac{3 EI \delta_o}{L^2} \\ \delta_o &= \frac{\frac{H}{2} L^3}{3 EI} \end{aligned} \quad (3)$$

Dengan memasukkan harga δ_o pada persamaan (3) ke dalam persamaan (2) diperoleh:

$$\beta = 1 + \left[\frac{\pi^2 EI}{4 L^2} \left(\frac{H L^3}{6 EI} \right) \left(\frac{2}{H L} \right) - 1 \right] \frac{1}{n}$$

$$\beta = 1 + \left(\frac{\pi^2}{12} - 1 \right) \frac{1}{n}$$

$$\beta = 1 - \frac{0,18}{n}$$

Dengan $n = \frac{P_e}{P} \geq 1$, harga terkecil dari $\beta = 0,82$ mendekati 0,85 seperti yang tercantum dalam PPBBI.

Sehingga rumus interaksi pada portal bergoyang atau untuk kolom yang ujungnya bergoyang, dibebani gaya normal dan momen lentur yang \perp sumbu x:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x} \leq \bar{\sigma}$$

atau

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Kestabilan terhadap penggoyangan pada portal.

- Ketidakstabilan secara keseluruhan akibat goyangan dapat terjadi bila seluruh kekuatan lateral untuk menahan goyangan dilampaui.
- Bila pembebanan pada suatu kolom lebih kecil dari kekuatannya, maka kekuatan cadangannya dapat dipakai untuk memberikan dukungan lateral pada kolom-kolom yang lain.

Konsep ini dapat dipakai pada portal-portal kaku yang dapat bergoyang (*unbraced frame*) di mana terdapat kolom-kolom yang ujung-ujungnya tidak dihubungkan dengan sambungan yang kaku. Dalam hal ini kolom-kolom yang lain yang ujung-ujungnya dihubungkan menurut sambungan yang kaku harus direncanakan untuk ikut menjamin stabilitas portal (konstruksi).

Karenanya pada kolom-kolom yang dihubungkan kaku pada ujungnya diberi momen tambahan sebesar $(V_x - N)e_x^*$ pada kestabilan arah \perp sumbu x dan $(V_y - N)e_y^*$ pada kestabilan arah \perp sumbu y.

e_x^* dan e_y^* adalah eksentrisitas tambahan yang memperhitungkan faktor-faktor tegangan sisa, torsi, eksentrisitas kebetulan, lipatan pada pelat dari bagian profil kolom, penyimpangan bentuk. V_x adalah beban dari bagian konstruksi pada kolom yang dijamin stabilitasnya pada arah \perp sumbu x, V_y ialah seperti V_x tetapi pada arah \perp sumbu y.

Besarnya eksentrisitas tambahan e_x^* dan e_y^* adalah sebagai berikut:

$$e_x^* = \delta_x \frac{W_x}{A} \quad \text{dan} \quad e_y^* = \delta_y \frac{W_y}{A}$$

di mana menurut TGB 1972:

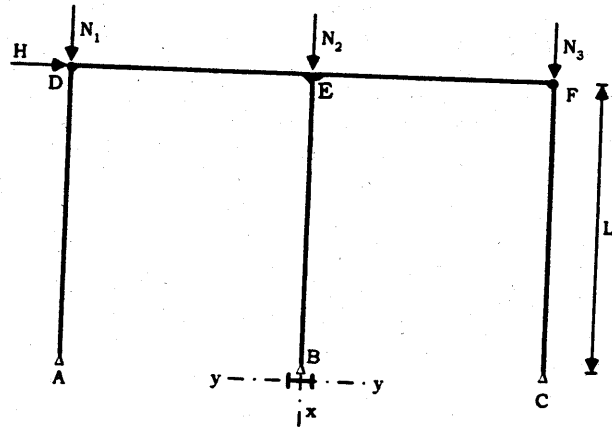
$$\delta_x = \left(1 - \frac{\lambda_x^2 \sigma_1}{\omega_x \pi^2 E} \right) (\omega_x - 1)$$

dan

$$\delta_y = \left(1 - \frac{\lambda_y^2 \sigma_1}{\omega_y \pi^2 E} \right) (\omega_y - 1)$$

Atau dapat dicari pada tabel 11 PPBBI.

V_x atau V_y dapat dijelaskan sebagai berikut:



- Kolom BE adalah dihubungkan sebagai jepit elastis di E. Jadi BE = Kolom yang ikut menjamin stabilitas konstruksi.
- Kolom AD dihubungkan sebagai sendi pendel di D.
- Kolom CF dihubungkan sebagai sendi pendel di F.
- $V_x = N_1 + N_2 + N_3$
- V_y = jumlah gaya normal kolom-kolom pada portal melalui BE arah \perp sumbu y (\perp bidang gambar).

Dengan memasukkan faktor-faktor tersebut di atas, rumus perencanaan menjadi sebagai berikut:

Untuk kolom di mana $V_x = V_y = N$

Pada keadaan momen melentur terhadap sumbu x, dipakai rumus:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x} \leq \bar{\sigma}$$

dan

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Pada keadaan momen melentur terhadap sumbu y, dipakai rumus:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Pada keadaan momen melentur terhadap sumbu x dan sumbu y, dipakai rumus:

$$\omega_{\max} \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} + 0,85 \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

dan

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Untuk kolom dimana $V_x \neq N$ atau $V_y \neq N$, dipakai rumus:

$$\omega_x \frac{N}{A} + \frac{n_x (V_x - N)e_x}{n_x - 1 W_x} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x}$$

$$0,85 \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

dan

$$\omega_y \frac{N}{A} + \frac{N_y (V - N)e_y}{n_y - 1 W_y} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x} + 0,85 \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

dan

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

di mana:

$$n_x = \frac{A \sigma_{EX}}{V_x} \quad \text{dan} \quad n_y = \frac{A \sigma_{Ey}}{V_y}$$

dan

$$e_x^* = \delta_x \frac{W_x}{A} \quad \text{dan} \quad e_y^* = \delta_y \frac{W_y}{A}$$

σ_{EX} atau σ_{EX} dapat dicari pada tabel 10 PPBBI

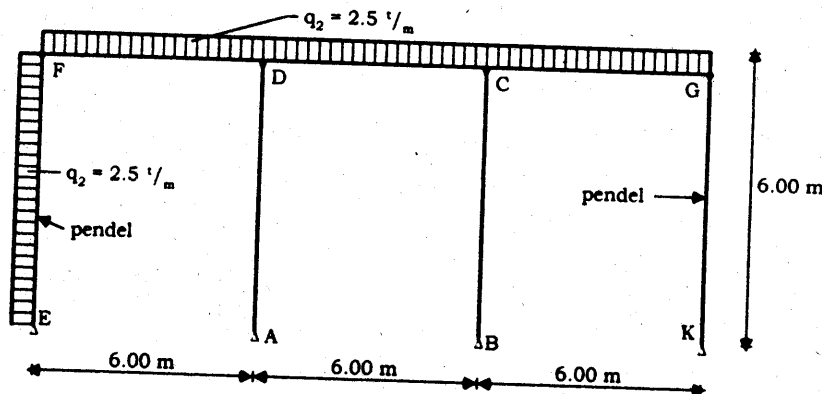
δ_x atau δ_y dapat dicari pada tabel 11 PPBBI

Contoh:

Suatu portal seperti tergambar, terdiri dari portal ADCB di mana hubungan di D dan C adalah kaku, dan kolom FE dan GK sebagai pendel. Dipakai profil DIN 26 baik kolom maupun balok. $\bar{\sigma} = 1600 \text{ kg/cm}^2$

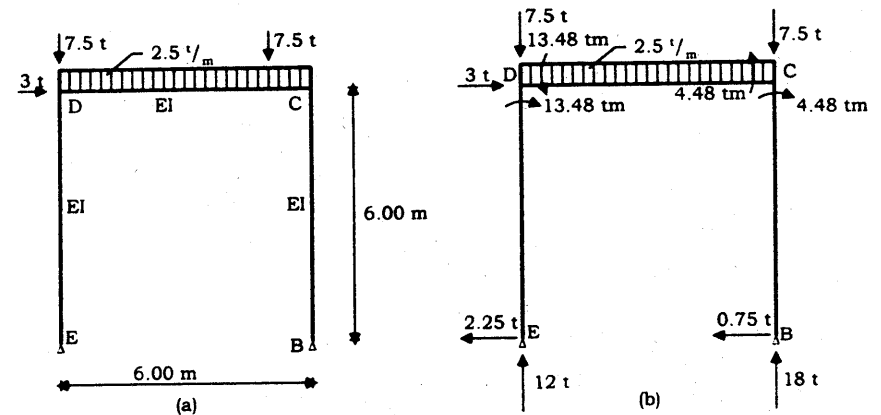
Sambungan balok FD pada kolom DA dan balok GC pada kolom CB adalah *simple connection*. Demikian juga sambungan kolom-kolom DA dan CB di D dan C arah \perp bidang gambar adalah *simple connection*.

Ditanyakan apakah kolom DA cukup kuat!



Jawab:

Pendukung utama seluruh portal adalah portal ADCB, sehingga dapat digambarkan beban-beban yang dipikulnya sebagai berikut:



Karena dipakai kolom dan balok dari profil yang sama yaitu DIN 26, maka kolom dan balok mempunyai EI yang sama. Dari pembebanan seperti tergambar diperoleh reaksi-reaksi dan momen seperti gambar (b). Gambar bidang momen seperti gambar (c).

DIN 26 mempunyai:

$h = 260 \text{ mm}$	$I_x = 15050 \text{ cm}^4$	$W_x = 1160 \text{ cm}^3$
$b = 260 \text{ mm}$	$I_y = 5280 \text{ cm}^4$	$W_y = 404 \text{ cm}^3$
$t_b = 11 \text{ mm}$	$i_x = 11,2 \text{ cm}$	$A = 121 \text{ cm}^2$
$t_s = 18 \text{ mm}$	$i_y = 6,6 \text{ cm}$	

Ditinjau kolom AD:

Mencari panjang tekuk

$$G_A = 10$$

$$G_D = \frac{\sum I_c / L_c}{\sum I_G / L_G} = \frac{15050 / 600}{15050 / 600} = 1$$

$$G_A = 10$$

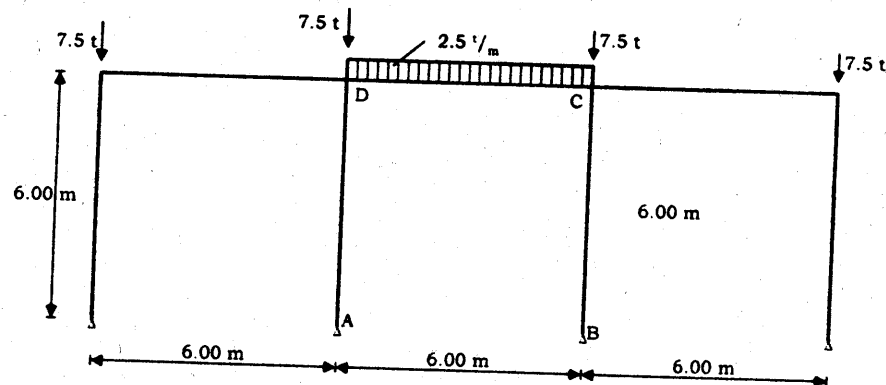
$$k = 1,9$$

$$G_D = 1$$

$$L_{kx} = 1,9 \times 6 = 11,4 \text{ m}$$

$$L_{ky} = 6 \text{ m}$$

(bila sambungan antara kolom AD dan balok memanjang \perp bidang gambar di D adalah simple connection) (= sendi).



$$\lambda_x = \frac{L_{kx}}{i_x} = \frac{11,4}{11,2} = 101,786$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} = \frac{6,00}{6,6} = 90,9$$

$$\text{Dari } \lambda_x = 101,786 \text{ diperoleh } \begin{cases} \omega_x = 2,0642 \\ \bar{\sigma}_{EX} = 1996 \text{ kg/cm}^2 \\ \delta = 0,4643 \end{cases}$$

$$V_x = 7,5 + 7,5 + 6 \times 2,5 + 7,5 + 7,5 = 45 \text{ t}$$

Yang memikul stabilitas portal bagian kiri dan kanan ialah portal ADCB dengan kolom-kolomnya ialah AD dan BC (2 kolom).

Kolom AD mempunyai $M = 13,48 \text{ tm} \approx 13,5 \text{ tm}$ dan gaya aksial $N = 12 \text{ t}$.

$$V_x \text{ pada kolom AD ialah } \frac{45}{2} \text{ t} = 22,5 \text{ t}$$

$$(V_x - N) = (22,5 - 12) = 10,5$$

$$e^* = \delta \frac{W_x}{A} = 0,4643 \times \frac{1160}{121} = 4,45 \text{ cm}$$

$$(V_x - N) e^* = 10,5 \times 4,45 = 46,725 \text{ t cm}$$

Mencari θ :

$$\theta = \frac{5 \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{kip} \left(8 - 3 \frac{M_1}{M_2} \right)} \geq 1,0$$

$$\frac{h}{t_b} = \frac{260}{11} = 23,64$$

$$\frac{L}{h} = \frac{600}{26} = 23,08$$

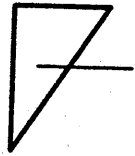
$$1,25 \frac{b}{t_s} = 1,25 \frac{26}{1,8} = 18,06$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{L}{h} > 1,25 \frac{b}{t_s} \end{array} \right\}$$

penampang tidak berubah bentuk

Ditinjau kolom AD:

Untuk menentukan statis tertentu atau tidak, yang dilihat gambar bidang M kolom. Bila gambar bidang M tidak mengadakan perubahan tanda, dianggap statis tertentu. Bila ada perubahan tanda + dan - berarti statis tak tentu.



tanda sama
Jadi statis tertentu

$$C_1 = \frac{L h}{b t_s} = \frac{600 \times 26}{26 \times 1,8} = 333 > 250$$

$$C_2 = 0,63 \frac{E}{\sigma} = 0,63 \times \frac{2,1 \times 10^6}{1600} = 826,875$$

$$250 < C_1 < C_2$$

dipakai rumus kip:

$$\bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma} - \frac{C_1 - 250}{C_2 - 250} \times 0,3 \bar{\sigma}$$

$$= 1600 - \frac{83}{576,875} \times 0,3 \times 1600 = 1531 \text{ kg/cm}^2$$

$$\theta = \frac{5 \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{kip} \left(8 - 3 \frac{M_{x1}}{M_{x2}} \right)} = \frac{65 \times 1600}{1531 (8 - 0)} = 0,65 \rightarrow \theta \text{ diambil } = 1$$

$$\omega_x \frac{N}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N)e_x}{W_x} + 0,85 \times 1 \times \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

$$N = 12 \text{ t}; \quad W_x = 1160 \text{ cm}^3; \quad \omega_x = 2,0642;$$

$$M_x = 13500100 \text{ kg cm}$$

$$\frac{(V_x - N)e_x}{W_x} = \frac{64725}{1160} = 55,79$$

$$\frac{n_x}{n_x - 1} = ? \quad n_x = \frac{A \bar{\sigma}_{EX}}{V_x} = \frac{121 \times 1996}{22500} = 10,73$$

$$\frac{n_x}{n_x - 1} = \frac{10,73}{9,73} = 1,1$$

$$\omega_x \frac{N}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N)e_x}{W_x} + 0,85 \times 1 \times \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} =$$

$$2,0642 \times \frac{12000}{121} + 1,1 \times 55,79 + 0,85 \times 1 \times 1,1 \times \frac{1350000}{1160}$$

$$= 204,7 + 61,4 + 1088,146$$

$$= 1354 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Kontrol pada ujung kolom:

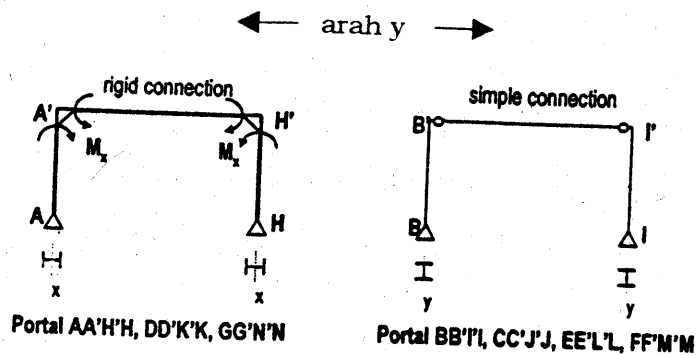
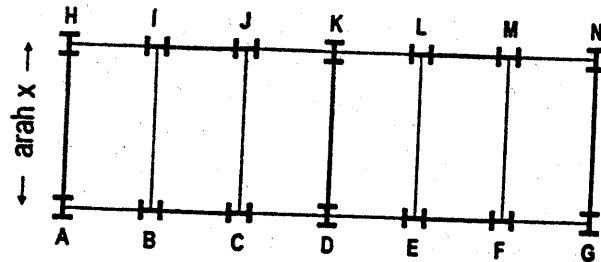
$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{12000}{121} + 1 \times \frac{1350000}{1160} = 99,17 + 1163,79$$

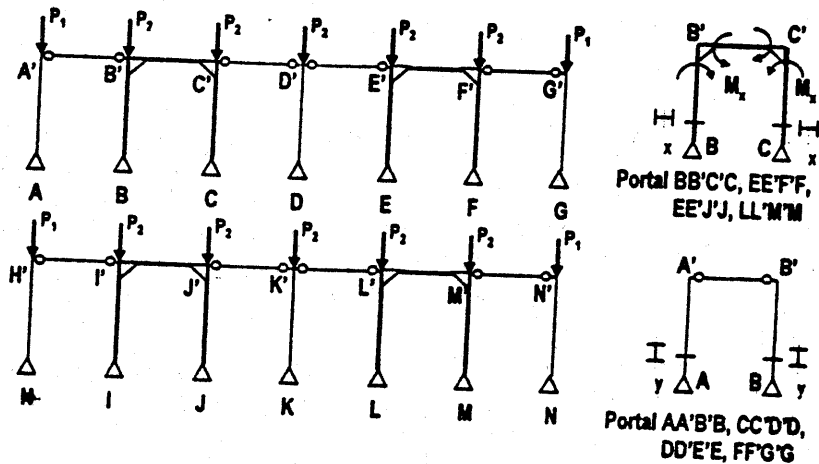
$$= 1268 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

Jadi kolom cukup kuat.

Penggunaan Rumus Beam-Column pada Portal Bergoyang
 CONTOH 1:



Gambar Portal arah x (arah melintang)



Gambar Portal arah y (arah memanjang)

Ditanyakan: Kekuatan kolom AA'

Ditinjau arah x

Ada 3 portal rigid (6 kolom) yang membantu 4 portal (8 kolom) yang labil. AA' termasuk kolom yang membantu arah x.

Ada 6 kolom yang membantu, 1 kolom (kolom AA') harga V_x -nya:

$$V_x = \frac{\sum P}{6} = \frac{10 P_2 + 4 P_1}{6} \rightarrow \text{ada harga } \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N) e_x^*}{W_x}$$

N = reaksi perletakan kolom AA'

Ditinjau arah y

Lihat portal AA'B'B dimana hubungan balok A'B' dengan kolom AA' di A' adalah sendi (flexible connection).

Jadi arah y kolom AA' tidak membantu apa-apa. berarti tidak ada

$$\text{harga } \frac{n_x}{n_y - 1} \frac{(V_y - N) e_y^*}{W_x} \rightarrow = 0$$

Rumus-rumus tegangan menjadi sbb:

$$1. \quad \sigma_x \frac{N}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N) e_x^*}{W_x} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

2. Arah y, titik A' = sendi, jadi $M_y = 0$. maka rumus menjadi:

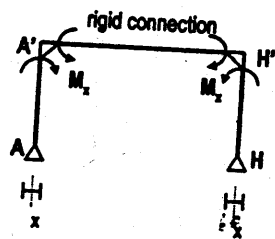
$$\sigma_y \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

3. Pada ujung kolom:

$$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Mencari Kekuatan kolom AA'

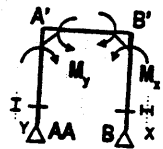
Arah Melintang (arah x)



Ada 3 portal rigid (6 kolom termasuk kolom AA') membantu 4 portal yang labil (8 kolom)

$$V_x = \frac{10 P_2 + 4 P_1}{6}$$

Arah Memanjang (arah y)



Ada 10 kolom yang rigid termasuk kolom AA'

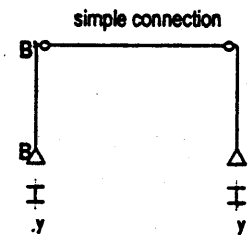
$$V_y = \frac{10 P_2 + 4 P_1}{10}$$

Rumus Menjadi

- $$\sigma_x \frac{N}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N)e_x^*}{W_x} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} + 0,85 \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$
- $$\sigma_y \frac{N}{A} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{(V_y - N)e_y^*}{W_y} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} + 0,85 \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$
- $$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Mencari kekuatan kolom BB'

Arah Melintang (arah x)

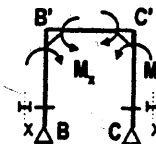


Titik B' = sendi berarti:

$$\frac{n_y}{n_y - 1} \frac{(V_y - N)e_y^*}{W_y} \text{ dan } \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_y}{W_y}$$

adalah = 0

Arah Memanjang (arah y)



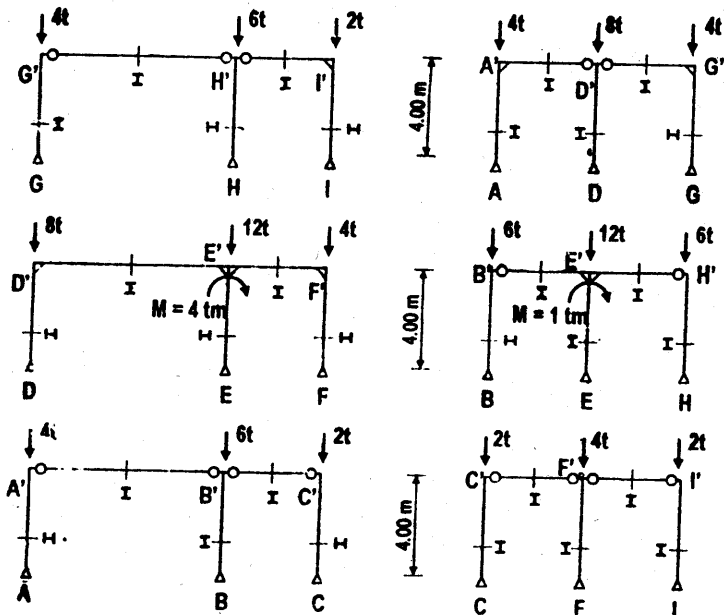
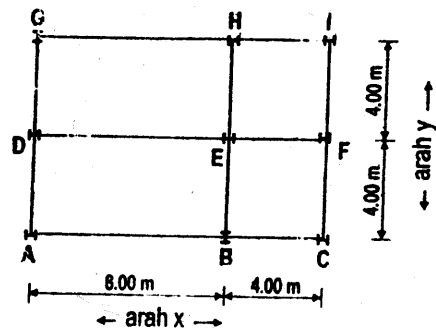
Ada 4 portal rigid (8 kolom) membantu 6 kolom yang labil

$$V_x = \frac{10 P_2 + 4 P_1}{10}$$

Rumus menjadi:

- $$\sigma_y \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$
- $$\sigma_x \frac{N}{A} + \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N)e_x^*}{W_x} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$
- $$\frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} \leq \bar{\sigma}$$

Contoh 3

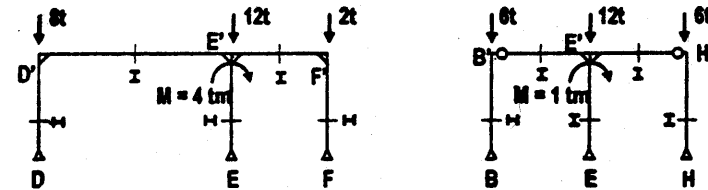


Suatu struktur bangunan gedung dengan denah, penampang portal dan beban-beban kolomnya seperti tergambar.

Ditanyakan: apakah kolom EE' cukup kuat?

Momen yang dipikul oleh kolom EE' arah melintang sebesar 4 t.m dan arah memanjang sebesar 1 t.m.

Semua kolom dari profil WF 250x250x9x14. Balok yang berbentuk 8 m dari WF 250x125x6x9. Sedangkan balok yang berbentuk 4 m dari WF 125x125x6,5x9. $\bar{\sigma}_{\text{baja}} = 1600 \text{ kg/cm}^2$



Arah Melintang

Arah Memanjang

Ditinjau arah melintang

Ada 5 kolom (flexible) yang dibantu oleh 4 kolom (rigid): Kolom yang membantu sebanyak 4 kolom termasuk kolom EE'

Dari 1 kolom (EE') diperoleh:

$$V_x = \frac{\sum P}{4} = \frac{48}{4} = 12t \quad \left. \begin{array}{l} V_x - N = 0 \\ N = 12t \end{array} \right\}$$

jadi pada rumus, harga $\frac{n_x}{n_x - 1} \frac{(V_x - N)e_x^*}{W_x} = 0$

Ditinjau arah memanjang

Ada 3 kolom yang membantu 6 kolom lainnya

$$V_y = \frac{\sum P}{3} = \frac{48}{3} = 16t \quad \left. \begin{array}{l} V_y - N = 16 - 12 = 4t \\ N = 12t \end{array} \right\}$$

jadi pada rumus, harga $\frac{n_y}{n_y - 1} \frac{(V_y - N)e_y^*}{W_y} \neq 0$

Rumus berubah sbb:

$$1. \quad \varpi_y \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} + 0,85 \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$2. \quad \varpi_y \frac{N}{A} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{(V_y - N)e_y^*}{W_y} + 0,85 \theta \frac{n_x}{n_x - 1} \frac{M_x}{W_x} + 0,85 \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$3. \quad \frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

Mencari panjang tekuk arah melintang (thd sb. x)

$$\left. \begin{aligned} G_E &= 10 \\ G_{E'} &= \frac{10800/4}{4050/8 + 847/4} = 3,7 \end{aligned} \right\} k = 2,4 \rightarrow L_{ky} = 2,4 \times 4 = 9,6 \text{ m}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} = \frac{960}{10,8} = 89 \quad \left\{ \begin{aligned} \varpi_x &= 1,781 \\ \sigma_{Ex} &= 2617 \text{ kg/cm}^2 \\ \delta_x &= 0,382 \end{aligned} \right.$$

Mencari panjang tekuk arah melintang (thd sb. y)

$$\left. \begin{aligned} G_E &= 10 \\ G_E &= \frac{3650/4}{1,5(847/4) \times 2} = 1,4 \end{aligned} \right\} k = 2,0 \rightarrow L_{ky} = 2,0 \times 4 = 8 \text{ m}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} = \frac{800}{6,29} = 127 \quad \left\{ \begin{aligned} \varpi_y &= 3,113 \\ \sigma_{Ey} &= 1285 \text{ kg/cm}^2 \\ \delta_y &= 0,85 \end{aligned} \right.$$

$$e_y^* = \delta_y \frac{W_y}{A} = 0,85 \cdot \frac{292}{92,18} = 2,69$$

$$n_x = \frac{A \cdot \sigma_{Ex}}{N} = \frac{92,18 \cdot 2617}{12000} = 20,1$$

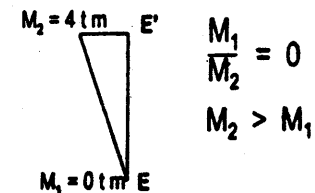
$$\frac{n_x}{n_x - 1} = \frac{20,1}{19,1} = 1,05$$

$$n_y = \frac{A \cdot \sigma_{Ey}}{N} = \frac{92,18 \cdot 1285}{12000} = 9,9$$

$$\frac{n_y}{n_y - 1} = \frac{9,9}{8,9} = 1,11$$

Mencari θ pada kolom EE'

$$\theta = \frac{5 \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{kip} (8 - 3 M_1 / M_2)}$$



Bentuk bidang M merupakan bentuk statis tertentu (tidak ada perubahan tanda momen). $\bar{\sigma}_{kip}$ dicari pada keadaan penampang tidak berubah bentuk-statis tertentu.

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{I_h}{b t_s} = \frac{400 \times 25}{25 \times 1,4} = 285,7 > 250 \\ C_2 &= 0,63 \frac{E}{\bar{\sigma}} = 0,63 \times \frac{2100000}{1600} = 826,9 \end{aligned} \right\} 250 < C_1 < C_2$$

Maka dipakai rumus: $\bar{\sigma}_{kip} = \bar{\sigma} - \frac{C_1 - 250}{C_2 - 250} \times 0,3 \times \bar{\sigma}$

$$\bar{\sigma}_{kip} = 1600 - \frac{285,7 - 250}{826,9 - 250} \times 0,3 \times 1600 = 1570 \text{ kg/cm}^2$$

$$\theta = \frac{5 \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_{kip} [8 - 3 M_1/M_2]} \geq 1$$

$$= \frac{5 \times 1600}{1570(8 - 30/40000)} = 0,64 < 1$$

Dipakai $\theta = 1$ (syarat: $\theta \geq 1$)

Rumus Interaksi

$$1. \quad \sigma_x \frac{N}{A} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x} + 0,85 \theta \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$1,781 \frac{12000}{92,18} + 0,85 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot \frac{400000}{867} +$$

$$0,85 \cdot 1,11 \cdot \frac{100000}{292} = 967 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

$$2. \quad \sigma_y \frac{N}{A} + \frac{n_y (V_y - N) e_y}{n_y - 1 W_y} + 0,85 \theta \frac{n_x M_x}{n_x - 1 W_x}$$

$$+ 0,85 \frac{n_y M_y}{n_y - 1 W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$3,113 \frac{12000}{92,18} + 1,11 \frac{4000 \cdot 2,69}{292} + 0,85 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \frac{400000}{867}$$

$$+ 0,85 \cdot 1,11 \frac{100000}{292} = 1181 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

$$3. \quad \frac{N}{A} + \theta \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \bar{\sigma}$$

$$\frac{12000}{92,18} + 1,0 \frac{400000}{867} + \frac{100000}{292}$$

$$= 934 \text{ kg/cm}^2 < 1600 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

PERHITUNGAN PELAT KAKI, BAUT ANGKER DARI KOLOM

Sebelum beban kolom diteruskan ke pondasi, kolom diterima dulu oleh pelat kaki yang berfungsi meratakan tekanan kolom pada pondasi. Antara kolom dengan pelat kaki dihubungkan dengan las.

Pondasi dapat terdiri dari bermacam-macam bahan, seperti pasangan bata yang dipleser baik, beton, batu kali, batu granit. Luas dari pelat kaki dapat dicari dari persamaan sebagai berikut:

$$F = L B \bar{\sigma}_d$$

di mana:

F = beban kolom sentris

L = panjang pelat kaki

B = lebar pelat kaki

$\bar{\sigma}_d$ = tegangan tekan ijin dari pondasi

Dengan menyatakan B dalam L atau sebaliknya, misalnya:

$$B = \frac{3}{5}L \dots \frac{2}{3}L \text{ dan seterusnya, maka dari rumus tersebut di}$$

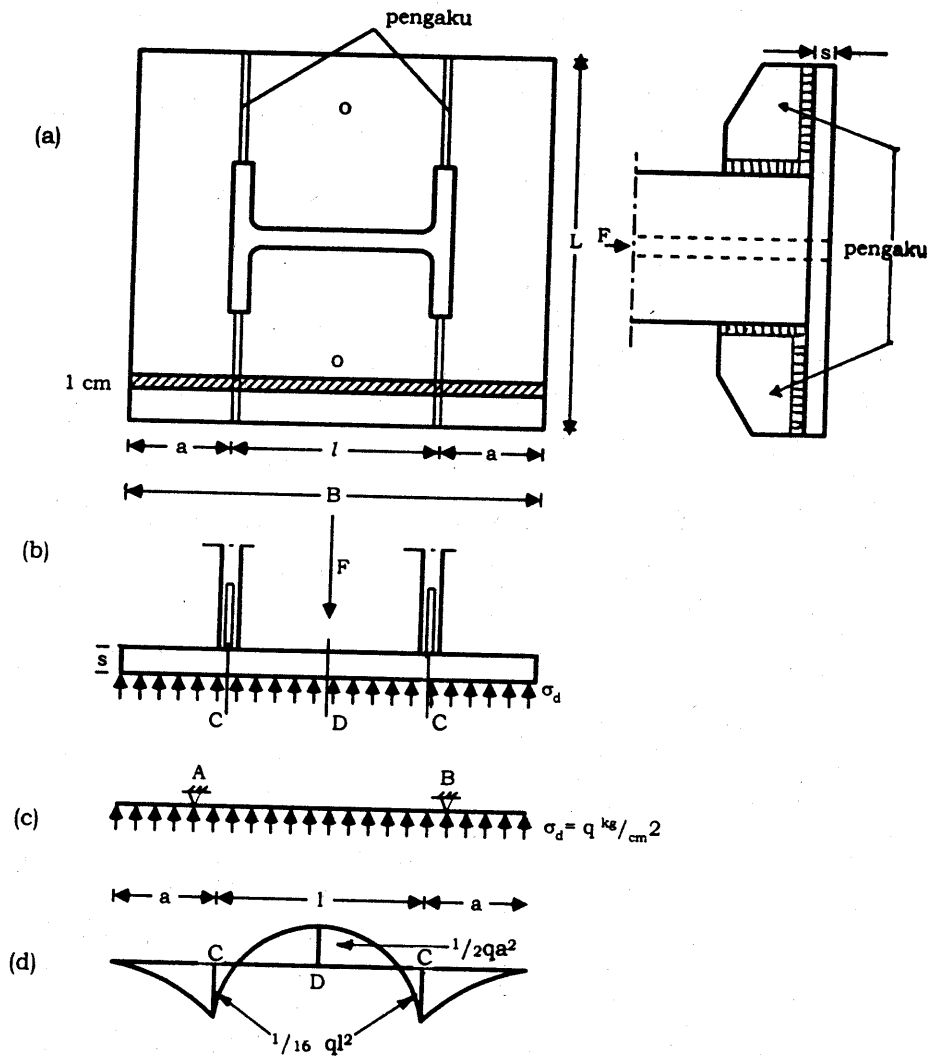
atas dapat dicari besarnya L, atau salah satu L atau B ditentukan dulu, maka yang lain dapat dicari.

Dengan mengambil suatu pias selebar 1 cm (lihat gambar yang diarsir Gambar 14.1a), dapat dihitung momen-momen maksimum

yang terjadi dengan beban σ_d terbagi rata dari pondasi (Gambar 14.1c dan 14.1d) Dengan beban terbagi rata $\sigma_d = q \text{ kg/cm}$:

pada potongan C terjadi $M_{\min} = \frac{1}{2} q a^2$

pada potongan D terjadi $M_{\max} = \frac{1}{16} q l^2$



Gambar 14.1

Agar efektif: $M_{\max} = M_{\min}$

$$\frac{1}{2} q a^2 = \frac{1}{16} q l^2 \rightarrow a^2 = \frac{1}{8} l^2 \rightarrow a = 0,35 l$$

$$B = 1 + 2a$$

$$= 1 + 0,7 l$$

$$B = 1,7 l$$

Mencari tebal pelat kaki:

$$\left. \begin{aligned} M_B &= \frac{1}{2} a^2 \sigma_d \\ \frac{\sigma_1}{\gamma} &= \frac{M_B}{W} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{untuk Bj 37} \\ &\sigma_1 = 2400 \text{ kg/cm} \\ &\frac{\sigma_1}{1,5} = \frac{2400}{1,5} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \\ &= \bar{\sigma} \end{aligned}$$

$$W = \frac{1}{6} s^2 \times 1 = \frac{1}{6} s^2$$

Maka:

$$\bar{\sigma} = \frac{M_B}{W}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\frac{1}{2} a^2 \sigma_d}{\frac{1}{6} s^2} \rightarrow s^2 = \frac{3 a^2 \sigma_d}{\bar{\sigma}}$$

$$s = a \sqrt{\frac{3 \sigma_d}{\bar{\sigma}}}$$

di mana:

σ_d = tegangan tekan pondasi yang terjadi

$\bar{\sigma}$ = tegangan tekan ijin baja

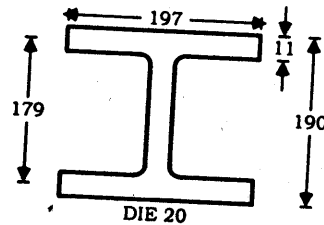
Catatan:

Uraian di atas adalah bila beban kolom adalah sentris.

Contoh:

Suatu kolom DIE 20 menahan beban sentris sebesar $P = 56$ ton. Baja dari Bj 37 mempunyai $\bar{\sigma} = 1600$ kg/cm². Pondasi beton.

- Ditanyakan: a. Ukuran pelat kaki
b. Tebal pelat kaki

Jawab:

- a. Menentukan ukuran pelat kaki:

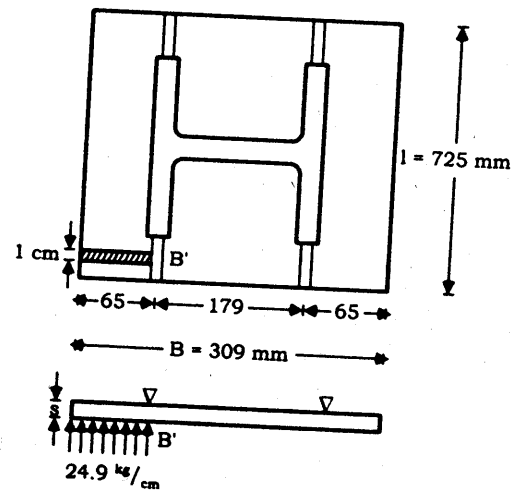
$$l = 17,9 \text{ cm}$$

$$B = 1,7l = 1,7 \times 17,9 = 30,43 \text{ cm } 31 \text{ cm}$$

$$a = 0,35l = 0,35 \times 17,9 = 6,265 \text{ cm } 6,3 \text{ cm}$$

Kenyataan $B = 310 \text{ mm}$

$$a = \frac{310 - 179}{2} = 65,5 \text{ mm } \approx 65 \text{ mm}$$



$$F = 56 \text{ ton}$$

$$B = 30,9 \text{ cm}$$

$$\text{Pondasi beton: } \bar{\sigma}_d = 25 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = L B \bar{\sigma}_d$$

$$56000 = 1,5 \times L \times 30,9 \times 25$$

$$L = \frac{56000}{1,5 \times 30,9 \times 25} = 48,3 \text{ cm } \approx 485 \text{ mm}$$

Kontrol:

$$\sigma_d = \frac{F}{L B} = \frac{56000}{1,5 \times 30,9 \times 48,5} = 24,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$< \bar{\sigma}_d = 25 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{OK})$$

- b. Menentukan tebal pelat kaki:

Ditinjau pias yang diarsir (gambar atas)

$$M_B = \frac{1}{2} \times a^2 \times \sigma_d = \frac{1}{2} \times 6,5^2 \times 24,9 = 526 \text{ kg cm}$$

$$W = \frac{1}{6} \times s^2 \times l$$

$$\bar{\sigma} = \frac{M_B}{W} = \frac{526 \times 6}{s^2} \rightarrow 1600 = \frac{526 \times 6}{s^2}$$

$$s^2 = \frac{526 \times 6}{1600} = 1,97 \text{ cm}$$

$$s = 1,4 \text{ cm}$$

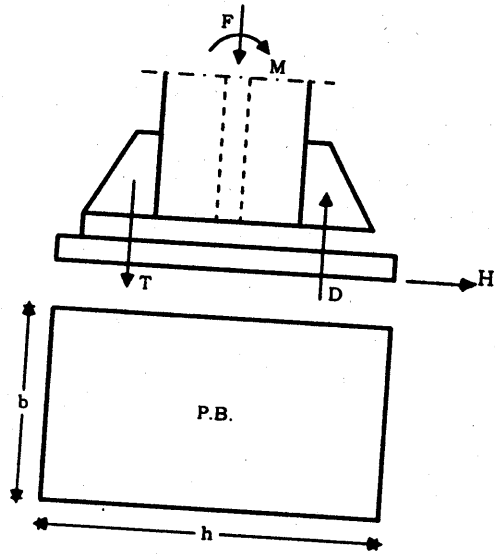
$$\text{Tebal } s = 14 \text{ mm}$$

Atau dengan rumus:

$$s = a \sqrt{\frac{3 \sigma_d}{\bar{\sigma}}} = 6,5 \sqrt{\frac{3 \times 24,9}{1600}} = 1,4 \text{ cm}$$

$$= 14 \text{ mm}$$

PELAT KAKI DENGAN BEBAN EKSENTRIS



Akibat adanya eksentrisitas gaya yang dipikul kolom, akan terjadi momen sebesar $F \cdot e$, bila F gaya yang dipikul dan e adalah eksentrisitas terhadap pusat berat penampang kolom (juga pusat berat pelat kaki).

Pada pusat berat kaki kolom (sumbu kolom) terdapat gaya aksial F dan momen M . Jadi di pusat berat kaki kolom juga bekerja momen M dan gaya normal F . Selain itu pada kaki kolom biasanya bekerja pula gaya horisontal H . Gaya H ini ditahan oleh geseran antara pelat kaki dan pondasi, sehingga pada pelat kaki hanya bekerja gaya F dan M , dan ditulis:

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{bh} \pm \frac{M}{W}$$

(pada penampang pelat kaki seluas $b \cdot h$ bekerja gaya sentris F dan momen M)

Momen M bekerja searah dengan panjang h , maka:

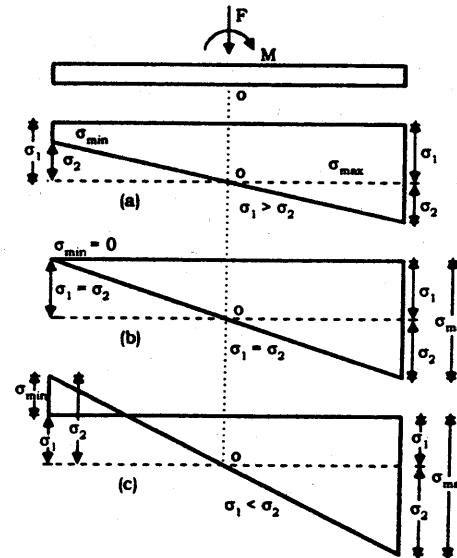
$$W = \frac{1}{6} b h^2$$

sehingga persamaan di atas berubah menjadi:

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{bh} \pm \frac{6M}{bh^2}$$

Harga σ_{\max} ini terdapat di ujung-ujung panjang h , dan harga σ_{\max} ini tekan (+) dapat pula tarik (-).

Hal ini dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



$$\sigma_{\max} = \frac{F}{bh} \pm \frac{6M}{bh^2}$$

$$\frac{F}{bh} = \sigma_1 \quad \frac{6M}{bh^2} = \sigma_2$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_1 - \sigma_2$$

Gambar 14.2

Kadaan Gambar 14.2a:

$$\frac{F}{bh} > \frac{6M}{bh^2}$$

berarti semua tegangan di bawah bidang pelat kaki adalah TEKAN

Kadaan Gambar 14.2b:

$$\frac{F}{bh} = \frac{6M}{bh^2}$$

berarti semua tegangan di bawah bidang pelat kaki masih tekan semua (di ujung kiri $\sigma_{min} = 0$)

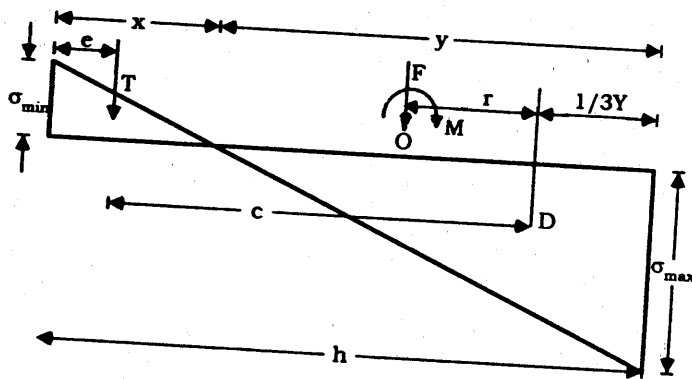
Keadaan Gambar 14.2c:

$$\frac{F}{bh} < \frac{6M}{bh^2}$$

berarti ada tegangan tarik (-) dan tegangan tekan (+) σ_{min} = tarik ; σ_{max} = tekan

- Pada keadaan (a) dan (b) teoritis tidak perlu angker kecuali bila H tidak dapat ditahan seluruhnya oleh gesekan antara pelat kaki dan bidang pondasi.
- Secara praktis harus diberi 2 angker.
- Pada keadaan (C) mutlak perlu angker, untuk menahan tarikan.

Ada 2 cara menentukan angker sebagai berikut:



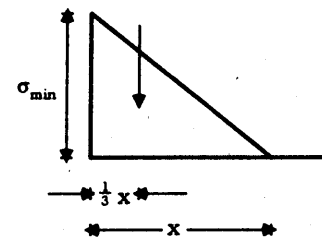
Cara I:
Baut angker dipasang 6 cm - 15 cm dari tepi pelat kaki bagian yang tertarik.

$$e = 6 \text{ cm} - 15 \text{ cm}$$

$$M = Tc + Fr \quad \rightarrow \quad T = \frac{M - Fr}{c}$$

Cara II:

Baut angker melalui pusat berat diagram tegangan tarik. Besarnya gaya:



$$T = \frac{1}{2} \times \sigma_{min} \times b$$

$$T = \frac{1}{2} \times b \times \sigma_{min}$$

Contoh:

Sebuah kaki kolom berdiri di atas pondasi beton. Kolom memikul beban sentris $P = 54$ ton dan momen $M = 1500$ t cm. Bila ditentukan lebar kaki $b = 60$ cm maka carilah besarnya h dari pelat kaki (ukuran pelat kaki $b \times h$).

Diketahui:

$$\bar{\sigma} \text{ baja} = 1600 \text{ kg/cm}^2 \quad \bar{\sigma} \text{ beton} = 25 \text{ kg/cm}^2$$

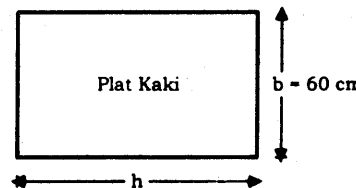
$$\bar{\tau} \text{ beton} = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma} \text{ baut (tarik)} = 0,7 \bar{\sigma} = 0,7 \times 1600 = 1120 \text{ kg/cm}^2$$

Hitunglah juga ϕ baut angker yang dipakai serta panjang dari baut angker tersebut.

Jawab:

a.



$$\bar{\sigma} \text{ pondasi} = 25 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W}$$

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{W} = 25 \text{ kg/cm}^2$$

$$25 = \frac{54000}{60h} + \frac{150000 \times 6}{60h^2}$$

$$900h + 150000 = 25h^2$$

$$25h^2 - 900h - 150000 = 0$$

$$h^2 - 36h - 6000 = 0$$

$$h_1 = 97,52 \text{ cm} \approx 100 \text{ cm}$$

Dipakai pelat kaki 600 x 1000

Kontrol:

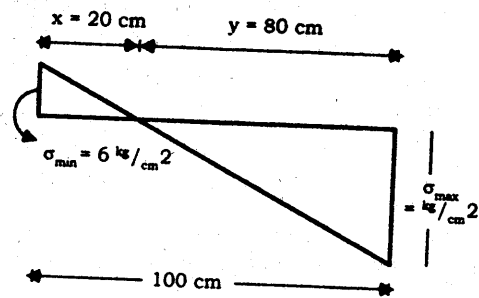
$$\sigma = \frac{54000}{60 \times 100} \pm \frac{1500000 \times 6}{60 \times 100^2} = 9 \pm 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\max} = 9 + 15 = 24 \text{ kg/cm}^2 < 25 \text{ kg/cm}^2 \text{ (OK)}$$

$$\sigma_{\min} = 9 - 15 = -6 \text{ kg/cm}^2$$

b. Mencari baut angker dan panjangnya:

Gambar diagram tegangannya:



$$\frac{x}{y} = \frac{6}{24} = \frac{1}{4}$$

$$y = 4x$$

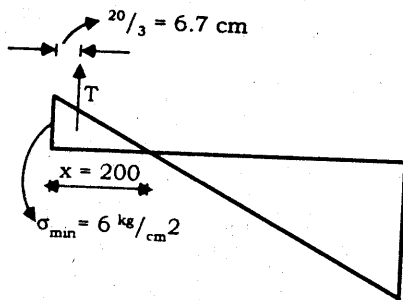
$$x + y = x + 4x$$

$$= 5x = 100 \text{ cm}$$

$$x = 20 \text{ cm}$$

$$y = 4 \times 20 = 80 \text{ cm}$$

Cara I: Baut angker diletakkan $\frac{1}{3}x$ dari ujung kiri



$$T = \frac{1}{2} \times 6 \times 20 \times b = \frac{1}{2} \times 6 \times 20 \times 60 = 3600 \text{ kg}$$

Gaya tarik yang dipikul baut angker = 3600 kg dengan perletakan angkernya 6,7 cm dari tepi kiri.

Kalau dipakai 2 angker, maka satu angker memikul gaya tarik

$$= \frac{1}{2} \times 3600 = 1800 \text{ kg}$$

$\bar{\sigma}_{\text{tarik}} = 1120 \text{ kg/cm}^2$ maka luas tampang baut angker:

$$A_{\text{baut}} = \frac{P}{\sigma_{\text{tarik}}} = \frac{1800}{1120} = 1,61 \text{ cm}^2$$

Dipakai ϕ baut = 3/4" mempunyai luas penampang teras

$$= 1,960 \text{ cm}^2 > 1,61 \text{ cm}^2 \text{ (OK)}$$

$$\phi \text{ baut} = 19,05 \text{ mm} \approx 19 \text{ mm}$$

$$\bar{\tau} \text{ beton} = 5 \text{ kg/cm}^2$$

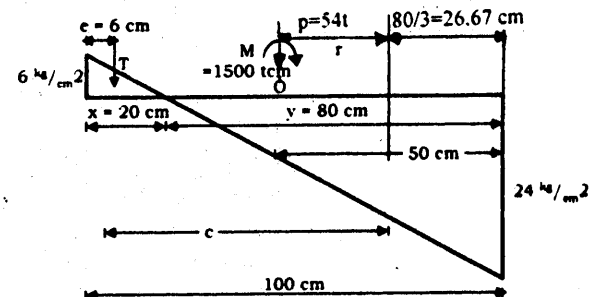
Luas bidang geser angker dengan pondasi beton

$$= 2 \pi r l = 2 \pi \times \frac{1,9}{2} \times l$$

$$\bar{\tau} \text{ beton} = \frac{P}{2 \pi \times \frac{1,9}{2} \times l} \rightarrow 5 = \frac{1800}{2 \pi \times \frac{1,9}{2} \times l}$$

$$l = \frac{1800}{5 \times 2 \pi \times \frac{1,9}{2}} = 60 \text{ cm}$$

Cara II: Baut angker diletakkan (6 cm - 15) cm dari tepi kiri



$$r = 50 - 26,67 = 23,33 \text{ cm}$$

$$c = 100 - 26,67 - 6 = 67,33 \text{ cm}$$

$$T = \frac{M - Pr}{c} = \frac{15 \cdot 10^5 - 5400 \times 23,33}{67,33}$$

$$= \frac{15 \cdot 10^5 - 1259820}{67,33} = 3567 \text{ kg}$$

Dipakai 2 baut angker.

Satu baut angker memikul beban tarik

$$\frac{1}{2} \times 3567 = 1783,5 \text{ kg}$$

$$A_{\text{baut}} = \frac{1783,5}{1120} = 1,59 \text{ cm}^2$$

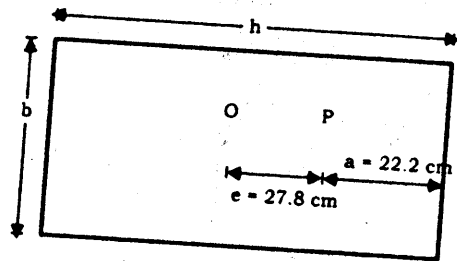
Dipakai baut angker $\phi 3/4$

mempunyai $A = 1,960 \text{ cm}^2 > 1,59 \text{ cm}^2$ (OK)

$$l = \frac{1783,5}{5 \times 2 \pi \times \frac{1,9}{2}} = 59,73 \text{ cm} \approx 60 \text{ cm}$$

Mencari tebal pelat bila ada eksentrisitas

Pondasi beton tidak mampu menahan tarikan. Maka diagram tegangan harus diubah agar menahan tekan saja.



Beban: $P = 54 \text{ t}$

$M = 1500 \text{ t cm}$

$M = P \cdot e$

$e = \frac{M}{P} = \frac{1500}{54} = 27,8 \text{ cm}$

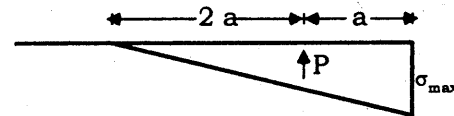
Ada eksentrisitas



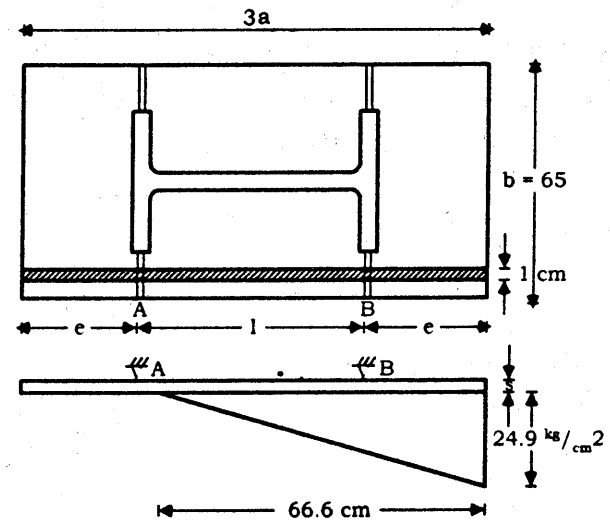
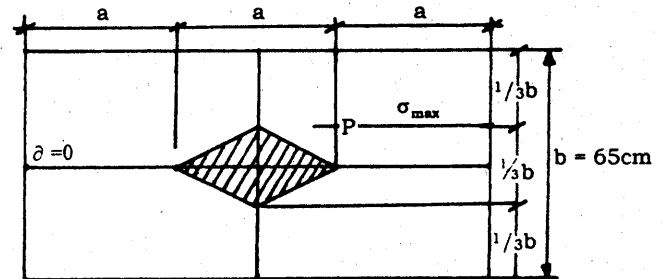
sebesar: $e = 27,8 \text{ cm}$

$a = 50 - 27,8 = 22,2 \text{ cm}$

Diagram tegangan ini dirubah menjadi tekan seluruhnya sebagai berikut:



Pada gambar luasan tampang segi empat dengan galih ditengah penampang (lihat gambar dibawah ini) diujung kiri tampang $\sigma = 0$ dan diujung kanan σ_{max} , bila gaya P terletak diujung kanan galih.



Dari diagram yang baru diketahui sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \times 3 a \times \sigma_{\max} \times b$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2 P}{3 a b} = \frac{2 \times 54}{9 \times 22,2 \times 60} = 0,027 \text{ t / cm}^2$$

$$= 27 \text{ kg / cm}^2 > 25 \text{ kg / cm}^2$$

b diambil = 65 cm, maka

$$\sigma = \frac{2 \times 54}{3 \times 22,2 \times 65} = 0,0249 \text{ t / cm}^2$$

$$= 24,9 \text{ kg / cm}^2 < 25 \text{ kg / cm}^2 \quad (\text{OK})$$

$$3 a = 3 \times 22,2 = 66,6 \text{ cm}$$

Ditinjau pias selebar 1 cm. Dicari M_B dan M lapangan. Dipakai M yang terbesar. Misalkan M_B lebih besar dari M lapangan, maka:

$$\sigma = \frac{M_B}{W} = \frac{M_B}{\frac{1}{6} s^2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{M_B}{\frac{1}{6} s^2} \rightarrow s^2 = \frac{6 M_B}{\bar{\sigma}} \rightarrow s = \sqrt{\frac{6 M_B}{\bar{\sigma}}}$$

(harga s minimum)

-ooOoo-

BAB

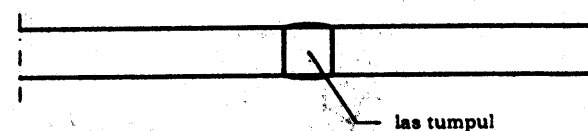
XV

SAMBUNGAN DENGAN LAS

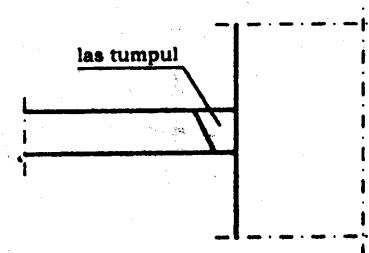
Sambungan dengan las ada dua macam, yaitu las tumpul dan las sudut.

Las Tumpul

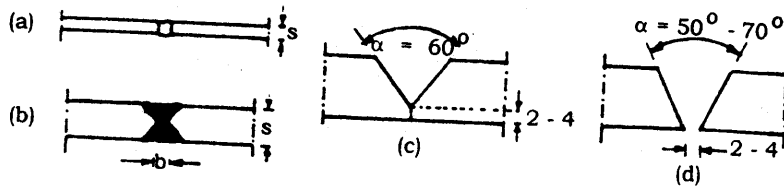
Untuk menyambung dua batang di mana setelah selesai pengelasan tidak ada lagi celah di antara kedua batang.



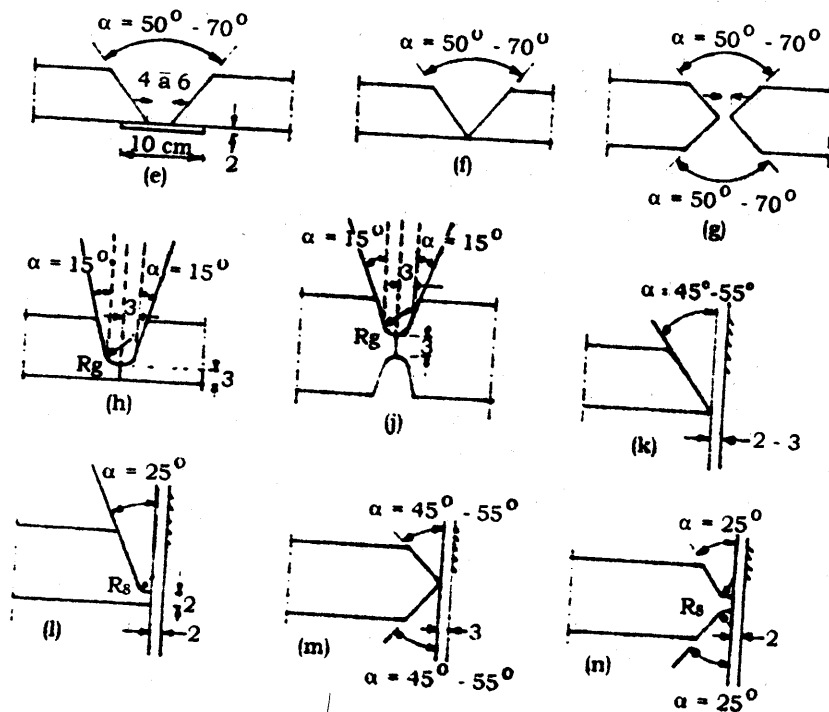
Kedua batang yang disambung tidak perlu selalu merupakan perpanjangan satu terhadap yang lain. Dapat juga membentuk sudut sebagai berikut:



Pada suatu pelaksanaan yang baik, di mana penampang las sesuai dengan penampang batang, tegangan pada las sama dengan tegangan pada batang, sehingga apabila batang itu telah cukup kuat, maka las itu tidak perlu dihitung lagi.



Macam-macam las tumpul adalah sebagai berikut:



Gambar 15.1

Gambar 15.1a : Sambungan I, dilas sepihak memakai tebal bahan 0,6 sampai 2,5 mm, dilas kedua pihak memakai tebal bahan 3-6 mm. Semua bukaan (lubang) antara 1,5 - 4 mm.

Gambar 15.1c : Sambungan V untuk tebal bahan 8-20 mm.

Gambar 15.1d : Sambungan V yang tajam untuk tebal bahan 3-25 mm.

Gambar 15.1e : Lubangnya tergantung dari tebal plat antara 2-4 mm.

Gambar 15.1f : Jika Gambar 15.1d sukar dilaksanakan, maka diberi strip (lihat gambar), yang kemudian dihilangkan stripnya setelah pengelasan selesai.

Gambar 15.1g : Sama dengan sambungan V yang tajam.

Gambar 15.1h : Sambungan x untuk tebal bahan 16-40 mm. Di sini bahan harus mudah dibalik.

Gambar 15.1i : Sambungan U yang normal untuk tebal bahan 16-40 mm.

Gambar 15.1j : Sambungan U normal dua arah untuk tebal bahan > 35 mm.

Gambar 15.1k : Sambungan setengah terbuka yang tajam untuk tebal bahan 4-20 mm.

Gambar 15.1l : Sambungan terbuka 1/2U sebelah untuk tebal bahan 12-40 mm.

Gambar 15.1m : Sambungan K untuk tebal bahan 10-40 mm.

Gambar 15.1n : Sambungan terbuka 1/2U dua belah untuk tebal bahan ≥ 30 mm.

Catatan:

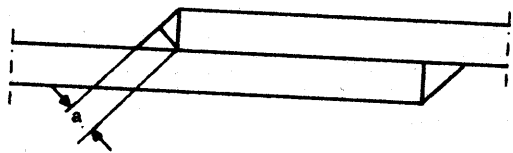
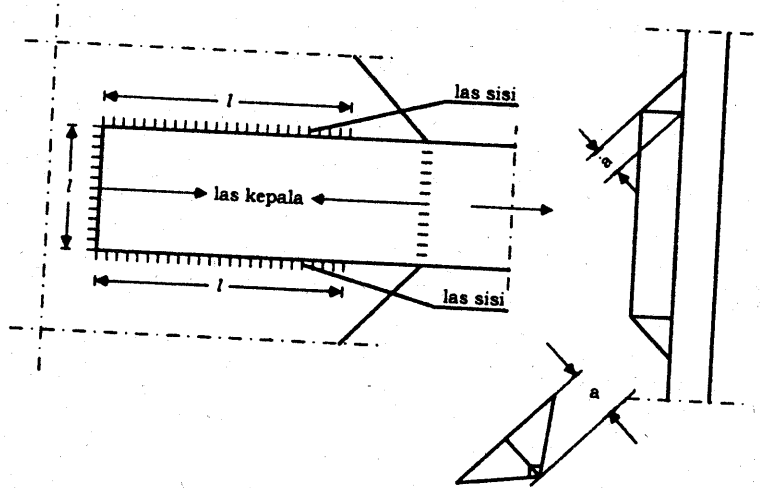
Gambar 15.1a sampai dengan 15.1j, sambungan dengan las tumpul di mana batang-batang yang disambung merupakan perpanjangan satu terhadap yang lain.

Gambar 15.1k sampai dengan 15.1n, sambungan dengan las tumpul di mana batang-batang yang disambung tegak lurus satu sama lain.

Las Sudut

Las sudut tergantung dari tempat di mana ia harus memikul. Jenis ini dibagi menjadi dua macam, yaitu sebagai berikut:

- a. Las kepala (koplas), di sini tegak lurus pada arah gaya.
- b. Las sisi (zijlas), di sini sejajar dengan arah gaya.



Umumnya las sudut penampangnya merupakan segitiga siku-siku sama kaki, sehingga penampang terkecilnya melalui garis tinggi pada sisi miring dari Δ siku-siku sama kaki (a).

Kalau panjang las = l , maka luas terkecil dari las ialah:
 $A = a \cdot l$

Ukuran terbesar dari a , umumnya tergantung dari tebal terkecil dari bahan yang disambung.

Pada umumnya $a_{min} = 4 \text{ mm}$.

Untuk konstruksi yang lebih kecil $a_{min} = 3 \text{ mm}$

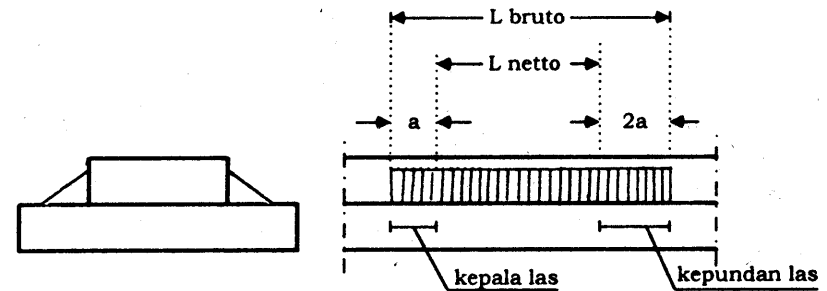
Dalam perhitungan dipakai panjang netto las, di mana: $l_{netto} = l_{brutto} - 3a$

Untuk las sudut:

$$l_{min} = 8a \quad \text{atau} \quad l_{min} = 40 \text{ mm}; \quad l_{max} = 40a$$

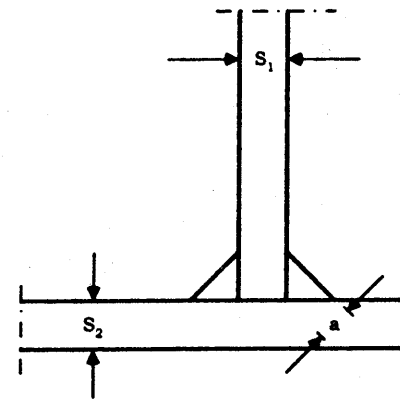
Bila s adalah tebal pelat yang disambung, maka:

$$a \leq \frac{1}{2} s \sqrt{2} = 0,7 s$$



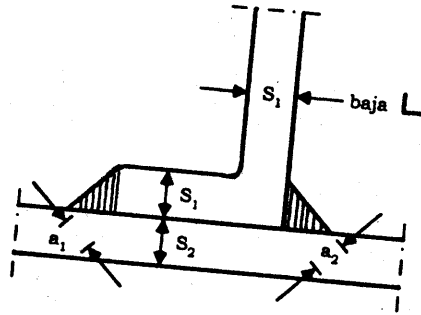
panjang kepala las = a
 panjang kepundan las = $2a$
 maka panjang $L_{netto} = L_{brutto} - 3a$

Ukuran las (a) untuk bermacam-macam keadaan sebagai berikut:



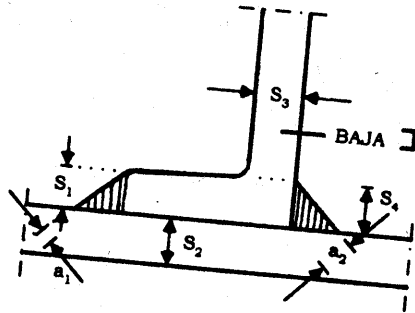
Jika $s_1 < s_2$, maka $a \leq 0,7 s_1$

Dalam hal khusus $a = s_1$



Jika $s_1 < s_2$, maka $a_1 \leq 0,7 s_1$

Jika $1,2 s_1 < s_2$, maka $a_2 \leq 0,7 \times 1,2 s_1$



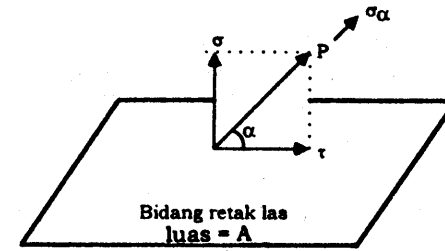
Jika $s_1 < s_2$, maka $a_1 \leq 0,7 s_1$

Jika $s_4 < s_2$, maka $a_2 \leq 0,7 s_4$

Bila suatu gaya P yang bersudut α terhadap bidang retak las akan terjadi tegangan miring σ_α yang bersudut α juga terhadap bidang retak las. Tegangan miring yang diijinkan ialah:

$$\bar{\sigma}_\alpha = c \bar{\sigma}$$

Tegangan α ini mempunyai komponen yang terletak pada bidang retak las, ialah τ , dan komponen yang tegak lurus bidang retak las σ .

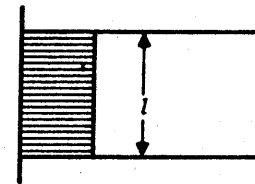
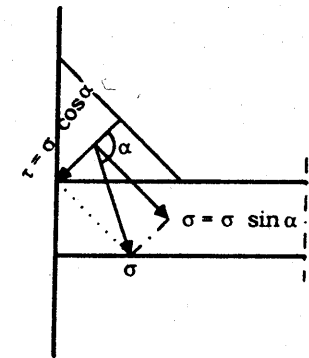
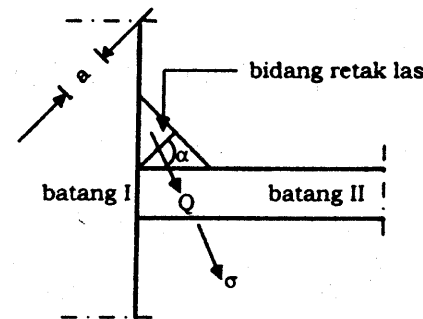


Tegangan σ_α yang terjadi = $\frac{P}{A}$ dimana P adalah gaya yang arahnya bersudut α terhadap bidang retak las dan A adalah luas bidang retak las.

Dengan adanya komponen-komponen σ dan τ maka terjadi tegangan idiiil:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Mencari besarnya c adalah sebagai berikut:



TAMPAK ATAS

Gaya Q bekerja terhadap bidang retak las (selebar a dan sepanjang l) bersudut α terhadap bidang retak las. Akibat gaya Q terjadi σ_α yang komponen-komponennya σ dan τ .

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$= \sqrt{\sigma_\alpha^2 \sin^2 \alpha + 3 \sigma_\alpha^2 \cos^2 \alpha}$$

Untuk $\sigma_i = \bar{\sigma}$ dan $\sigma_\alpha = \bar{\sigma}_\alpha$, maka

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_\alpha \sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}$$

$$\frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}$$

$$\bar{\sigma}_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \bar{\sigma}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}$$

$$\bar{\sigma}_\alpha = c \bar{\sigma}$$

$$\frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\sigma}} = c$$

Selanjutnya harga c ini untuk bermacam-macam sudut dicantumkan dalam tabel sebagai berikut:

α	$\frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\sigma}}$
0°	0,58
5°	0,58
10°	0,58
15°	0,59
20°	0,60
25°	0,61
30°	0,63

α	$\frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\sigma}}$
35°	0,65
40°	0,68
45°	0,71
50°	0,74
55°	0,78
60°	0,82
65°	0,86

α	$\frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\sigma}}$
70°	0,90
75°	0,94
80°	0,97
85°	0,99
90°	1,00

Bila $\alpha = 0$

Q bekerja pada bidang retak las, tidak ada tegangan normal σ , yang ada ialah tegangan geser τ .

$$\bar{\sigma}_\alpha = 0,58 \bar{\sigma} \rightarrow \bar{\sigma}_\alpha = \bar{\tau}_\alpha = 0,58 \bar{\sigma}$$

Bila $\alpha = 45^\circ$: $\bar{\sigma}_\alpha = 0,71 \bar{\sigma}$

Bila $\alpha = 90^\circ$

Q bekerja \perp bidang retak las, sehingga tidak ada tegangan geser τ .

$$\bar{\sigma}_\alpha = \bar{\sigma}$$

Catatan:

Mengenai las ini, PPBBI 1983 masih memakai peraturan Belanda TGB 1949 (*Technise Grondslagen voor Bouwvoorschriften 1949*). Di negeri Belanda sendiri sudah dipakai TGB 1970 Staal, di mana dasar perhitungan idil dari las bukan lagi:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

melainkan memakai:

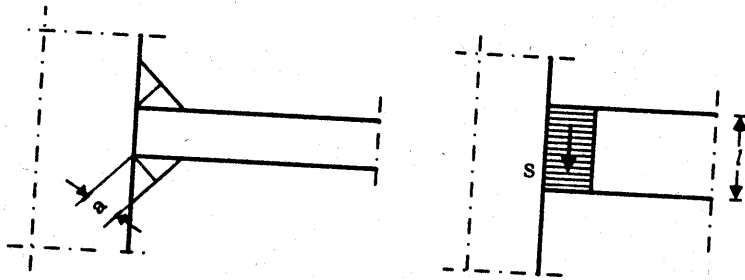
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 1,8\tau^2}$$

Dengan demikian harga c yang didapat lebih besar dari harga c yang didasarkan:

$$\sigma_i \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

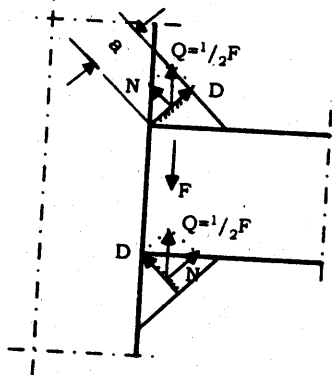
sehingga kemampuan las dengan ukuran yang sama adalah lebih besar, jadi lebih ekonomis. Mungkin alasan PPBBI 1983 memakai cara lama, karena kurang yakin akan keahlian tukang las di Indonesia.

Ada enam dasar keadaan untuk pemakaian las:
Kejadian 1



$$\tau_{\parallel} = \frac{S}{a l}$$

Kejadian 2



$$\begin{aligned} N = D &= \frac{1}{2} Q \sqrt{2} \\ &= \frac{1}{4} F \sqrt{2} \\ &= 0,353 F \end{aligned}$$

Untuk bagian atas:

$$\sigma = \frac{N}{a l} \rightarrow \sigma = \frac{+0,353 F}{a l}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{N}{a l} \rightarrow \tau_{\perp} = \frac{-0,353 F}{a l}$$

Untuk bagian bawah:

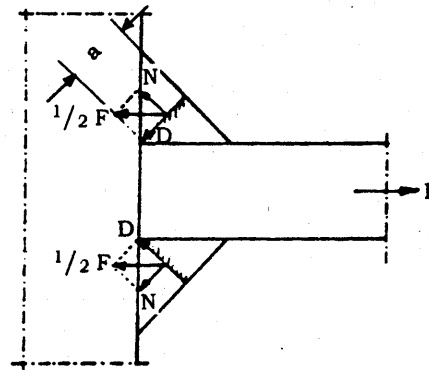
$$\sigma = \frac{-0,353 F}{a l}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{+0,353 F}{a l}$$

Catatan:

Bila N tarik $\sigma = +$ dan N tekan $\sigma = -$
Bila D menuju titik sudut $\tau = +$ dan
D meninggalkan titik sudut $\tau = -$

Kejadian 3

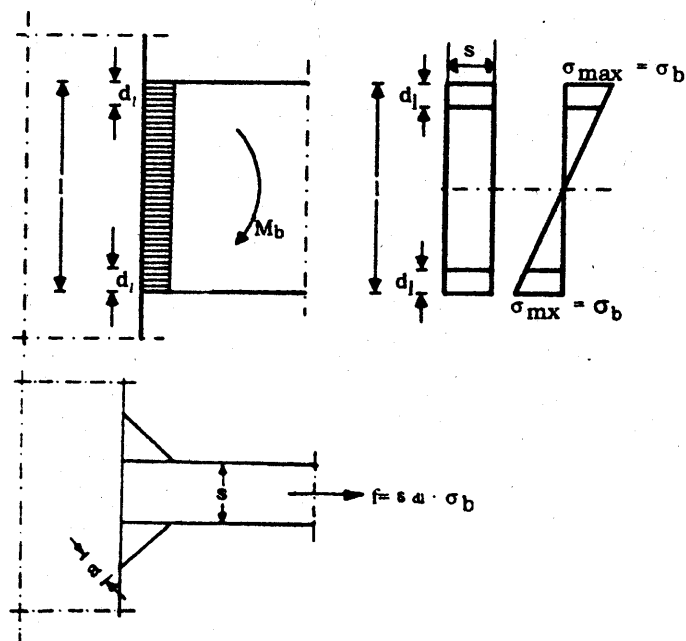


$$\begin{aligned} N = D &= \frac{1}{2} F \sqrt{2} \\ &= \frac{1}{4} F \sqrt{2} \\ &= 0,353 F \end{aligned}$$

$$|\sigma| = \frac{0,353 F}{a l}$$

$$|\tau| = \frac{0,353 F}{a l}$$

Kejadian 4



Dari pelat yang disambung (s x 1) diketahui:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_b}{W} = \frac{6 M_b}{s l^2}$$

Gaya yang dipikul oleh pias setebal dl (di atas dan bawah ialah):

$$F = s \times dl \times \sigma_b$$

Selanjutnya seperti keadaan 3 dimana:

$$F = s \times dl \times \sigma_b, \text{ didapat:}$$

$$\sigma = \pm \frac{0,353 s dl \sigma_b}{a dl}$$

$$= \pm \frac{0,353 s \sigma_b}{a}$$

$$\sigma_b = \sigma_{\max} = \frac{6 M_b}{s l^2}$$

maka:

$$\sigma = \pm \frac{0,353 s 6 M_b}{a s l^2}$$

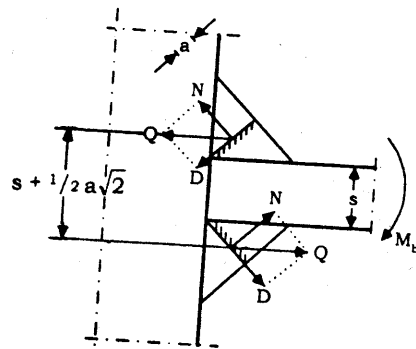
atau $\sigma = \pm \frac{2,12 M_b}{a l^2}$

Jadi:

$$\underline{\sigma = \pm \frac{2,12 M_b}{a l^2}}$$

dan $\underline{\tau_{\perp} = \pm \frac{2,12 M_b}{a l^2}}$

Kejadian 5



$$M_b = Q (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2}) \rightarrow Q = \frac{M_b}{s + \frac{1}{2} a \sqrt{2}}$$

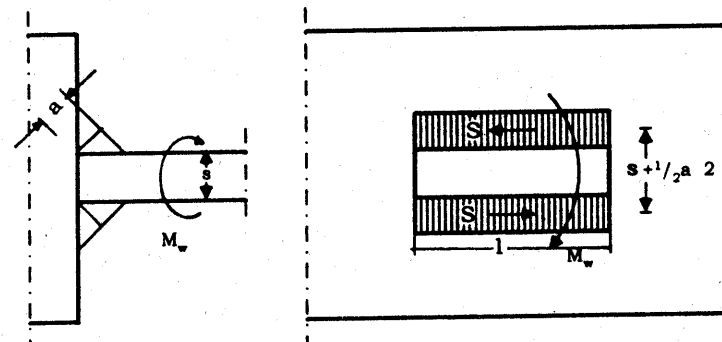
$$|N| = |D| = \frac{1}{2} Q \sqrt{2} = 0,707 Q$$

$$|\sigma| = |\tau| = \frac{0,707 Q}{a l} = \frac{0,707 M_b}{a l (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}$$

$$\underline{|\sigma| = \frac{0,707 M_b}{a l (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}}$$

$$\underline{|\tau_{\perp}| = \frac{0,707 M_b}{a l (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}}$$

Kejadian 6



Mw = momen puntir

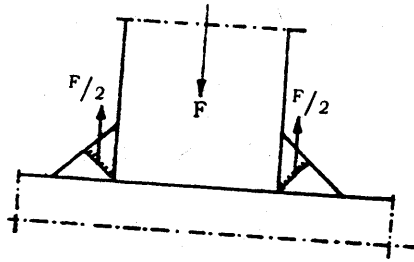
$$M_w = S (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2}) \rightarrow S = \frac{M_w}{(s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{S}{a l} = \frac{M_w}{a l (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}$$

$$\underline{\tau_{\perp} = \frac{M_w}{a l (s + \frac{1}{2} a \sqrt{2})}}$$

Keadaan-keadaan Khusus

Misalnya sambungan antara kolom dengan pelat kaki di mana beban kolom adalah sentris. Di sini tegangan yang diijinkan dinaikkan 20% dan dengan $\alpha = 45^\circ$ didapat:



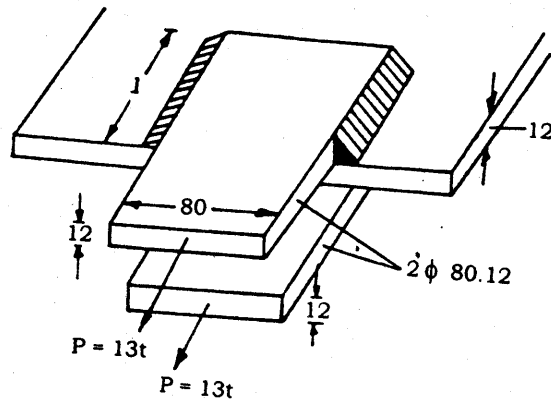
$$\bar{\sigma}_\alpha = 1,2 \times 0,71 \bar{\sigma} = 0,852 \bar{\sigma}$$

$$F = 0,852 \bar{\sigma} 2 a l$$

Catatan: Panjang las l dari kejadian 1 s/d kejadian 6 dan keadaan khusus adalah l_{neto} .

Contoh 1:

Dua batang dari pelat ukuran $\square 80.12$ menahan beban masing-masing $P = 13$ t. Kedua pelat ini disambung dengan pelat kopel yang mempunyai tebal juga 12 mm. $\bar{\sigma}$ las = 1600 kg/cm². Rencanakan sambungan lasnya.



Jawab:

Pelat $\square 80.12$ dilas kedua sisinya, maka masing-masing las memikul beban $\frac{1}{2} \times 13 = 6,5$ t.

Arah gaya P sejajar bidang retak las $\rightarrow \alpha = 0^\circ$. $\bar{P} = 0,58 \bar{\sigma} A$

$$A = \frac{\bar{P}}{0,58 \times 1600} = \frac{6500}{0,58 \times 1600} = 7 \text{ cm}^2$$

$$A = a l = 7 \text{ cm}^2$$

$l_{max} = 40 a$; kalau yang dihitung l_{neto} maka:

$$l_{n max} = 40 a - 3 a = 37 a$$

$$a \times 37 a = 7 \rightarrow 37 a^2 = 7 \rightarrow a^2 = \frac{7}{37}$$

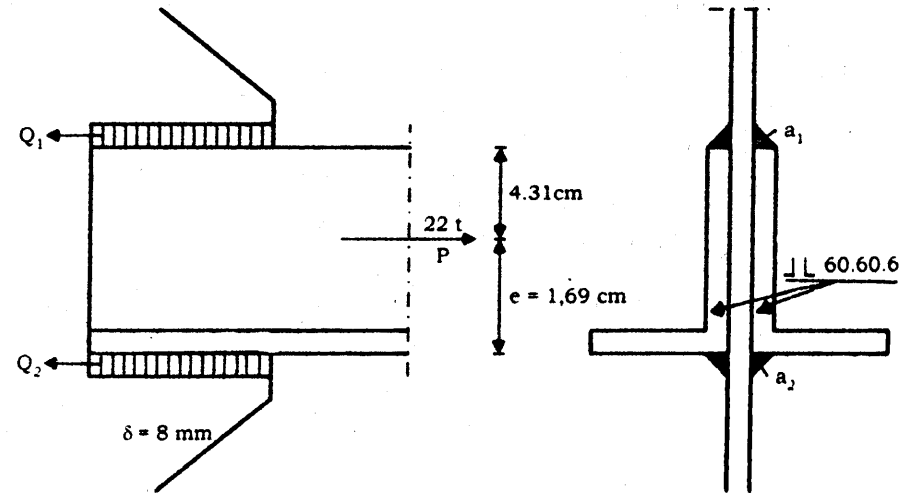
$$a = 0,45 \text{ cm} \approx 5 \text{ mm}$$

Syarat:

$$a \leq \frac{1}{2} S \sqrt{2} = \frac{1}{2} \times 12 \sqrt{2} = 8,49 \text{ mm} > 5 \text{ mm} \quad (\text{OK}).$$

Jadi dipakai panjang las $l_{br} = 40 \times 5 = 200$ mm dengan tebal $a = 5$ mm.

Contoh 2:



2 $\llcorner 60.60.6$ disambung dengan pelat simpul dengan tebal $a = 8$ mm. Pada 2 $\llcorner 60.60.6$ bekerja gaya tarik $P = 22$ t. $\bar{\sigma}$ las = 1600 kg/cm². Rencanakan sambungan lasnya.

Jawab:

P diterima las a_1 dan las a_2 .

$$\text{Las } a_1 \text{ menerima beban } Q_1 = \frac{1,69}{6} \times 22 \text{ t} = 6,2 \text{ t.}$$

$$\text{Las } a_2 \text{ menerima beban } Q_2 = \frac{4,31}{6} \times 22 \text{ t} = 15,8 \text{ t.}$$

$$\text{Jumlah} = 22 \text{ t}$$

Syarat a_1 :

$$S_1 = 6 \text{ mm} < S_2 = 8 \text{ mm, maka } a_1 \leq \frac{1}{2} S_1 \sqrt{2} = 4,24 \text{ mm}$$

$$a_1 = 4 \text{ mm}$$

Syarat a_2 :

$$1,2 S_1 = 1,2 \times 6 = 7,2 \text{ mm}$$

$$S_2 = 8 \text{ mm}$$

$$1,2 S_1 < S_2$$

$$a_2 \leq \frac{1}{2} 1,2 S_1 \sqrt{2}$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \times 1,2 \times 6 \sqrt{2} = 5,09 \text{ mm}$$

$a_2 = 4 \text{ mm}$ (disamakan dengan a_1) (dalam satu sambungan harus dipakai alas yang sama)

Dipakai $a_1 = a_2 = 4 \text{ mm}$.

Baik untuk las a_1 maupun las a_2 gaya yang bekerja sejajar bidang retak las berarti $\alpha = 0^\circ$.

Ditinjau las a_1 :

$$\text{Untuk satu las } a_1 \rightarrow P = \frac{6200}{2} = 3100 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 0,58 \bar{\sigma} A_1$$

maka :

$$A_1 = \frac{\bar{P}}{0,58 \bar{\sigma}} = \frac{3100}{0,58 \times 1600} = 3,34 \text{ cm}^2$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 = a_1 l \rightarrow l = \frac{A_1}{a_1} = \frac{3,34}{0,4} = 8,35 \text{ cm} \\ l_{n \max} = 37a = 37 \times 0,4 = 14,8 \text{ cm} \end{aligned} \right\} l_n < l_{n \max} \quad (\text{OK})$$

Disini l adalah l_{netto}

Ditinjau las a_2 :

$$\text{Untuk satu las } a_2 \rightarrow P = \frac{15800}{2} = 7900 \text{ kg}$$

$$\bar{P} = 0,58 \bar{\sigma} A_2$$

maka:

$$A_2 = \frac{\bar{P}}{0,58 \bar{\sigma}} = \frac{7900}{0,58 \times 1600} = 8,5 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = a_2 l$$

$$8,5 = 0,4 l \rightarrow l = \frac{8,5}{0,4} = 21,25 \text{ cm}$$

l disini adalah l_{netto}

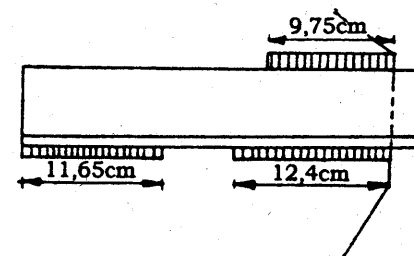
$$l_{\text{netto} \max} = 40a - 3a = 37a$$

$$= 37 \times 0,4 = 14,8 \text{ cm}$$

$$l_n > l_{\text{net} \max}$$

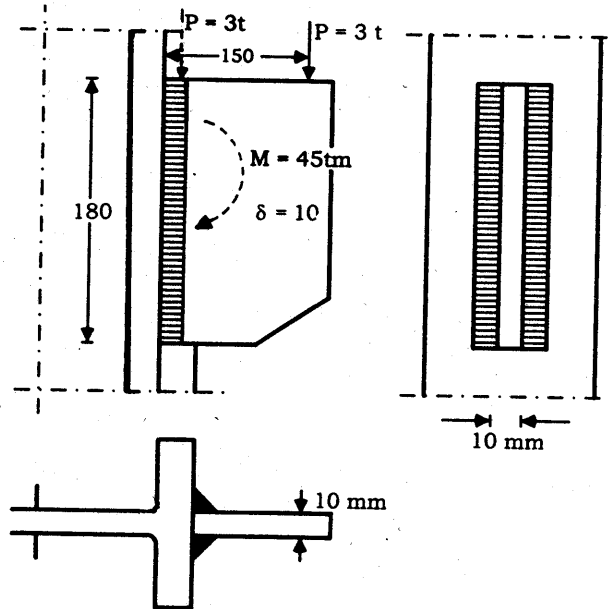
Las dipisah jadi dua bagian, yaitu $l_{\text{net}1} = 10,25 \text{ cm}$ dan $l_{\text{net}2} = 11 \text{ cm}$.

Digambar selalu dipakai l_{bruto} . Las bagian atas $l_{\text{br}} = 8,35 + 1,4 = 9,75 \text{ cm}$ dan bawah bagian kiri $l_{\text{br}} = 10,25 + 1,4 = 11,65 \text{ cm}$ las bawah kanan $l_{\text{br}} = 11 + 1,4 = 12,4 \text{ cm}$.



Contoh 3:

$\bar{\sigma}$ las = 1600 kg/cm². Pelat konsol tebal = 10 mm memikul beban $P = 3t$ berjarak 150 mm dari flange kolom. Rencanakan sambungan lasnya.



Tebal flange > tebal pelat konsol $\delta = 10$ mm

Jawab:

Las selain harus memikul momen $M = 3 \times 15 = 45t \text{ cm} = 45000 \text{ kgcm}$, juga memikul gaya geser $P = 3t = 3000 \text{ kg}$. Syarat las $a \leq \frac{1}{2} \times 10 \sqrt{2} = 7,07 \text{ mm}$. Dipakai $a = 7 \text{ mm}$. Akibat $M = 45000 \text{ kg cm}$ terjadi:

$$l_{\text{brutto}} = 180 \text{ mm}$$

$$l_n = 180 - 3 \times 7 = 15,9 \text{ cm}$$

$$\sigma = \frac{2,12 M}{a l^2} = \frac{2,12 \times 45000}{0,7 \times 15,9^2} = 539 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{\perp} = \frac{2,12 M}{a l^2} = 539 \text{ kg/cm}^2$$

Akibat $P = 3000 \text{ kg}$ terjadi τ_{\parallel} ($\sigma = 0^\circ$)

$$\tau_{\parallel} = \frac{P}{2 A} = \frac{3000}{2 a l} = \frac{3000}{2 \times 0,7 \times 15,9} = 135 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{\parallel} + \tau_{\perp} \rightarrow \tau = \sqrt{\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2} = \sqrt{135^2 + 539^2}$$

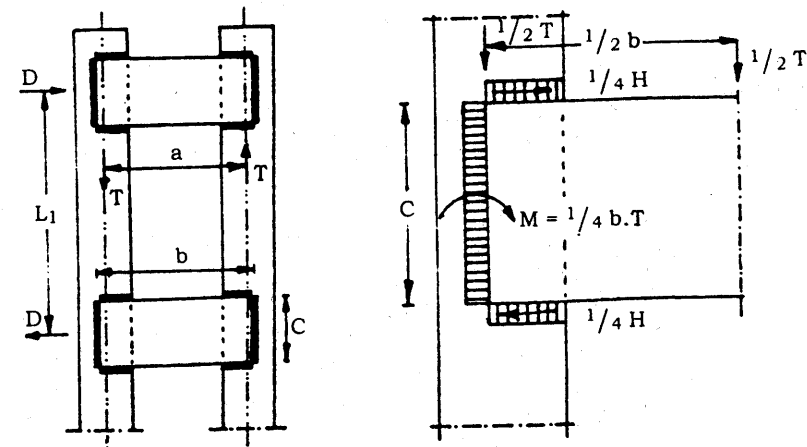
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{539^2 + 3(135^2 + 539^2)}$$

$$= \sqrt{290521 + 3(308746)} = 1103 \text{ kg/cm}^2$$

< 1600 kg/cm² (OK)

Contoh 4:

Pemakaian las pada pelat kopel



$$D \times L_1 = T \times a \rightarrow T = \frac{D L_1}{a}$$

Supaya dapat dilas, pelat kopel diperkecil panjangnya untuk penempatan lasnya.

Untuk mencari H ditinjau sebagai berikut:

Pada las terdapat:

$$M = \frac{1}{2} T \times \frac{1}{2} b = \frac{1}{4} T b$$

Selain M juga ada gaya geser $\frac{1}{2} T$

$\frac{1}{2} T$ dipikul oleh las vertikal dan $M = \frac{1}{4} T b$ dipikul oleh las horisontal, sehingga didapat:

$$\frac{1}{4} H C = M \rightarrow \frac{1}{4} H C = \frac{1}{4} T b \rightarrow H C = T b$$

$$H = \frac{T b}{C}$$

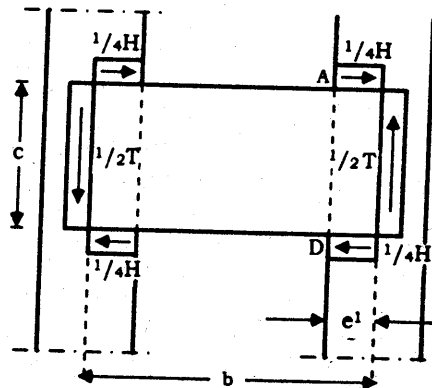
Untuk perhitungan yang lebih teliti dapat dipakai:

$$H \left(C + \frac{1}{2} a \sqrt{2} \right) = T \left(b + \frac{1}{2} a \sqrt{2} \right)$$

bila tebal bidang retak las = a semua, sehingga:

$$H = \frac{T \left(b + \frac{1}{2} a \sqrt{2} \right)}{\left(C + \frac{1}{2} a \sqrt{2} \right)}$$

Untuk meninjau keamanan pelat kopel, diambil M_{\max} sebagai berikut:



Tampang berbahaya dari pelat kopel pada potongan AB Momen terbesar terletak pada potongan AB =

$$M_{AB} = M_{\max} = \frac{1}{4} H C - \frac{1}{2} T \cdot l'$$

-ooOoo-

BAUT MUTU TINGGI (HIGH STRENGTH BOLT)

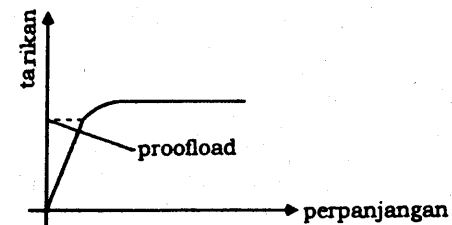
Pada penyambungan pelat baja dengan BMT ini, pelat akan ditekan (diklem) satu sama lain. Pada bidang sambungan terjadi *shear resistance* (tahanan geser) yang besarnya tergantung juga pada faktor geser permukaan F . Besarnya F ini dapat dilihat pada tabel 25 PPBBI 1983.

Dengan memutar mur BMT dengan kunci yang khusus, akan terjadi *clamping force* T (yang besarnya dapat dibaca pada alat kunci) yang membuat kedua pelat baja saling menekan.

Untuk dapat memperoleh *clamping force* T yang besar perlu dipakai bahan baut dari baja mutu tinggi. Karenanya disebut Baut Mutu Tinggi.

Dasarnya *clamping force* ini, atau disebut *proofload* (pembebanan tarik awal) dibatasi sesuai dengan mutu bahan dan diameter bautnya. Pembebanan tarik awal (*proofload*) ialah N_0 adalah sama dengan *clamping force* T ($N_0 = T$).

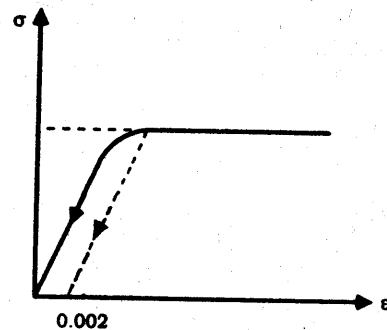
Hubungan antara gaya tarik baut dengan perpanjangan (*elongation*) dapat dilihat sebagai berikut:



Untuk baja mutu tinggi umumnya tidak terdapat batas yang nyata dari titik leburnya/lelehnya. Maka di USA misalnya, untuk BMT A325 diambil batas proporsional sebagai proofload = 70% dari minimum tensile strengthnya. Menurut aturan Belanda, diambil batas regangan (rekrens) = 0,2%.

Secara eksperimen dapat diambil tegangan tarik pada baut:

$$\sigma_t = 0,8 R_{0,2} \text{ (turun 20\%)}$$



$R_{0,2}$ adalah tegangan dengan 0,2% regangan yang tinggal pada baut. Selanjutnya untuk BMT dipakai mutu baja dari baut 10.9.

Baut 10.9

Artinya sebagai berikut:

Bilangan pertama (10) = $\frac{1}{100}$ x minimum tensile strength (R_m) dalam N/mm^2 .

Maka baut 10.9 mempunyai minimum strength

$$R_m = 10 \times 100 = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Bilangan kedua (9) = $10 \times \frac{R_{0,2}}{R_m}$

$$9 = 10 \times \frac{R_{0,2}}{1000} \rightarrow R_{0,2} = \frac{9 \times 1000}{10} = 900 \text{ N/mm}^2$$

$R_{0,2}$ adalah tegangan dengan 0,2% regangan (strain) yang tinggal.

Singkatnya sebagai berikut:

- Bilangan pertama x 100 = R_m (minimum tensile strength) dalam N/mm^2 .
- Bilangan pertama x bilangan kedua x 10 = $R_{0,2}$ (tegangan dengan sisa regangan 0,2%) dalam N/mm^2 .

Jadi baut 10.9:

$$\text{Mempunyai } R_m = 10 \times 100 = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{0,2} = 10 \times 9 \times 10 = 900 \text{ N/mm}^2$$

BMT dengan mutu baja 10.9 ini mempunyai diameter 12 sampai dengan 27 mm, yaitu: M12, M16, M20, M24 dan M27. Harga proofload dari macam-macam baut ini dapat dibaca pada tabel sebagai berikut:

Harga Proofload (N_0) dan Gaya Tarik Batas (N_t) untuk BMT dengan mutu 10,9

		M12	M16	M20	M24	M27
Proofload (N_0) dalam	kN	60,667	112,795	176,249	253,793	330,761
	kgf	6088,6	11320	17688,6	25471	33195,6
Gaya tarik batas (N_t) dalam	kN	60,667	112,795	176,249	253,793	330,761
	kgf	6088,6	11320	17688,6	25471	33195,6

Di negeri Belanda dipakai satu macam BMT ialah 10.9. Di USA dipakai dua macam BMT, yaitu A325 dan A490.

Ukuran Garis Tengah dan Luas Penampang Melintang BMT

	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Garis tengah nominal luar d_n	12	16	20	24	27	30
Garis tengah nominal teras d_1	9,853	13,546	16,933	20,319	23,319	25,706
Garis tengah nominal rata-rata d_2 $= (d_n + d_1)/2$	10,863	14,701	18,376	22,051	25,051	27,727
Garis tengah bidang potongan tegangan d_s	10,358	14,123	17,654	21,185	24,185	26,716

	M12	M16	M20	M24	M27	
Luas penampang baut dengan diameter luar AST	113,09	201,06	314,15	452,38	572,55	706,85
Luas penampang teras A kem	76,24	144,11	225,19	324,26	427,08	518,99
Luas penampang tegangan As	84,26	156,66	244,79	352,49	459,39	560,39

Catatan:

- Garis tengah dalam mm.
- Luas-luas tampang dalam mm²

$$A_s = \frac{1}{4} \pi \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2$$

Akibat proofload N_o timbul clamping force $T = N_o$

Akibat clamping force timbul shear resistance $F.T$ atau $F.N_o$, di mana:

- F = faktor geser permukaan
- N_o = proofload

Bila n = banyaknya bidang geser dan ϕ = faktor keamanan = 1,4 (PPBBI), maka kekuatan sebuah BMT terhadap geser ialah:

$$N_g = \frac{F}{\phi} n N_o$$

Proofload:

$$N_o = A_s \sigma_t \quad \text{di mana} \quad \sigma_t = 0,8 R_{o,2}$$

Untuk BMT 10.9:

$$R_{o,2} = 10 \times 9 \times 10 = 900 \text{ N/mm}^2 = 90 \text{ kN/cm}^2$$

$$R_m = 10 \times 100 = 1000 \text{ N/mm}^2 = 100 \text{ kN/cm}^2$$

$$N_o = A_s \times 0,8 R_{o,2}$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_s^2 \quad \text{di mana} \quad d_s = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

d_1 = diameter teras (pada ubin)

d = diameter baut

$$d_2 = \frac{d + d_1}{2}$$

(1)

Ternyata untuk semua baut M12 sampai dengan M27 besarnya A_s adalah 10% lebih besar dari luas penampang teras.

Jika N_m adalah beban patah, maka:

$$N_m = A_s R_m$$

$$R_{o,2} = 90 \text{ kN/cm}^2$$

$$R_m = 100 \text{ kN/cm}^2$$

$$R_m = \frac{100}{90} R_{o,2} = \frac{10}{9} R_{o,2}$$

$$N_m = A_s \times \frac{10}{9} R_{o,2} \quad (2)$$

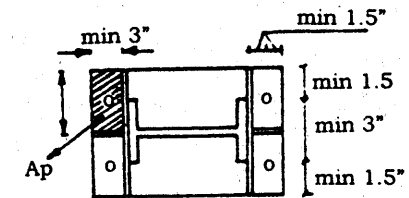
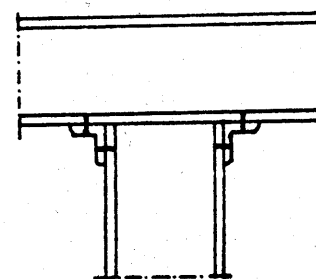
(1) dan (2):

$$\frac{N_m}{N_o} = \frac{A_s \frac{10}{9} R_{o,2}}{A_s 0,8 R_{o,2}} = \frac{100}{72}$$

$$N_o = \frac{N_m}{1,4} \rightarrow N_o = 0,7 N_m$$

Proofload = 0,7 min tensile strengthnya

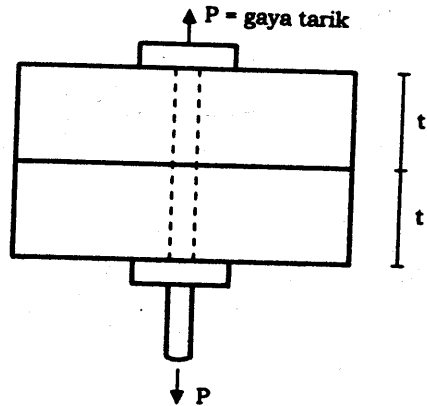
Pengaruh Tarikan Terhadap Proofload pada BMT



Pengaruh gaya tarik luar F pada proofload.

Ditinjau satu baut di mana mempunyai luas bidang benturan = A_p (bagian yang diarsir). Gaya tarik P dipikul oleh 4 BMT di mana masing-masing BMT mendapat tarikan sebesar:

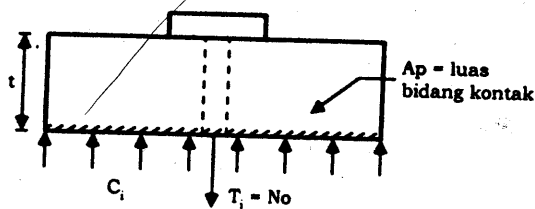
$$\frac{1}{4} P$$



(a)

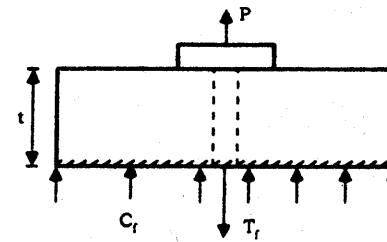
Ditinjau satu BMT:

Gambar di atas adalah BMT yang sudah disetel (dipasang) dibebani tarikan sebesar P .



(b)

Gambar di atas adalah keadaan di mana BMT yang sudah disetel tapi belum dibebani gaya tarik luar P . Sebelum dibebani P , baut telah mempunyai proofload sebesar T_i . Akibat gaya proofload T_i , terjadi tekanan sebesar C_i pada bidang kontak sehingga $T_i = C_i$.



(c)

Gambar di atas adalah keadaan di mana BMT setelah dibebani gaya tarik luar P . Setelah dibebani gaya tarik luar P , pada baut terjadi tarikan sebesar T_f .

Akibat T_f ini pada bidang kontak terjadi tekanan sebesar C_f . Akibat T_f baut mengalami perpanjangan sebesar:

$$\delta_b = \frac{T_f - T_i}{A_b E_b} t$$

Akibat T_f pelat mengalami pertebalan:

$$\delta_p = \frac{C_i - C_f}{A_p E_p}$$

$$C_i > C_f$$

Supaya masih tetap ada kontak antara kedua pelat yang disambung, maka δ_b harus sama dengan δ_p , sehingga:

$$\frac{T_f - T_i}{A_b E_b} t = \frac{C_i - C_f}{A_p E_p} t \rightarrow \frac{T_f - T_i}{A_b E_b} = \frac{C_i - C_f}{A_p E_p}$$

Kenyataan pada umumnya E untuk bermacam-macam mutu baja adalah sama, maka $E_b = E_p = E$ sehingga:

$$\frac{T_f - T_i}{A_b} = \frac{C_i - C_f}{A_p}$$

$$C_i = T_i \text{ (lihat gambar b)}$$

$$P + C_f = T_f \text{ (lihat gambar c)} \rightarrow C_f = T_f - P$$

Dari ketiga persamaan ini diperoleh:

$$\frac{T_f - T_i}{A_b} = \frac{T_i - T_f + P}{A_b}$$

$$(T_f - T_i) \frac{A_p}{A_b} = T_i - T_f + P$$

$$T_f \left(1 + \frac{A_p}{A_b}\right) = T_i \left(1 + \frac{A_p}{A_b}\right) + P$$

$$T_f = T_i + \frac{P}{1 + \frac{A_p}{A_b}}$$

Tampak dari sini, akibat pembebanan P pada BMT, terdapat penambahan tarikan pada proofload sebesar:

$$\frac{P}{1 + \frac{A_p}{A_b}}$$

Bila besarnya P diambil = \bar{P} dari baut ($\bar{P} = A_b \bar{\sigma}_b$) dan luas bidang kontak A_p diambil luas minimum, maka akan diperoleh harga:

$$\frac{P}{1 + \frac{A_p}{A_b}} = 4\% T_i (= 4\% N_o)$$

Jadi tambahan tarikan pada proofload akibat beban P hanya 4% T_i , sedangkan harga T_i yang sebenarnya masih 5% - 10% lebih tinggi, sehingga akibat gaya tarik pada BMT penambahan tarikan ini tidaklah berarti.

Kenyataan dalam pelaksanaan untuk memudahkan pemutaran mur sering diambil $A_p > A_p$ minimum (jarak antara baut dan baut dan antara baut dan tepi dibuat > jarak minimumnya) sehingga harga $P/(1+A_p/A_b)$ akan lebih kecil lagi.

Besarnya P jika dihitung ternyata harus < proofload. Pada gaya tarik maks $P = 0,7 N_o$ dapat terjadi tidak lagi adanya kontak antara kedua bidang pelat yang disambung, menurut PPBBI 83.

Kekuatan sebuah BMT terhadap gaya aksial tarik ialah:

$N_t = 0,6 N_o$ untuk beban statis

$N_t = 0,5 N_o$ untuk beban bolak balik

Apabila BMT mengalami kombinasi beban tarik dan geser maka dipakai rumus sebagai berikut:

$$N_g = \frac{F}{\phi} n (N_o - 1,7 T)$$

di mana:

F = faktor geser permukaan (lihat tabel 25 PPBBI 83)

ϕ = faktor keamanan = 1,4

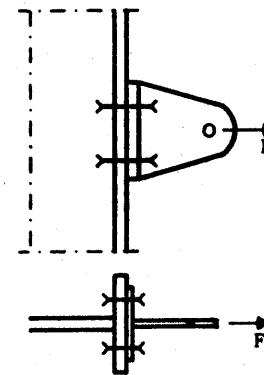
N_o = pembebanan tarik awal (proofload)

n = jumlah bidang geser

T = gaya aksial tarik yang bekerja

Gaya geser yang terjadi $\frac{D}{n} \leq N_g$ dan $T \leq N_t$

Contoh:

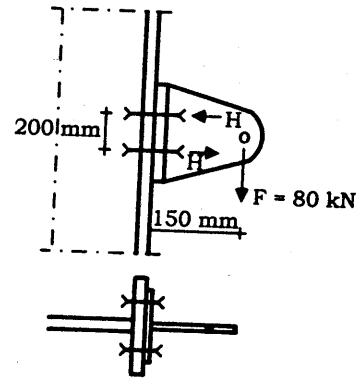


Hitunglah gaya tarik F maksimum yang dapat dipikul oleh 4BMT M24. $N_t = 0,6 N_o$

M24 mempunyai $N_o = 253,793 \text{ kN}$

$N_t = 0,6 \times 253,793 \text{ kN} = 152 \text{ kN}$

Ada 4 BMT, jadi $F = 4 \times 152 = 608 \text{ kN}$.



Untuk memikul beban $F = 80 \text{ kN}$, dipakai 4 BMT M12. Faktor geser permukaan $F = 0,35$. Selidikilah apakah BMT M12 cukup kuat.

$$M = 15 \times 80 = 1200 \text{ kN cm}$$

$$20 H = 1200$$

$$H = 60 \text{ kN}$$

Akibat momen 1200 kN cm terjadi gaya tarik H pada BMT atas sebesar 60 kN (diterima 2 baut) 1 baut menerima beban 30 kN.

$$N_t = 0,6 N_o = 0,6 \times 60,667 = 36,4 \text{ kN} > 30 \text{ kN (OK)}$$

Akibat $F = 80 \text{ kN}$, 4 BMT menerima beban vertikal:

$$\frac{80}{4} = 20 \text{ kN.}$$

$$N_g = \frac{F}{\phi} n N_o = \frac{0,35}{1,4} \times 1 \times 60,667 = 15,17 \text{ kN}$$

< 20 kN (tidak cukup)

$$\text{Ingat! } \frac{D}{n} \leq N_g$$

$$T \leq N_t$$

Dipakai BMT M16 mempunyai $N_o = 112,795 \text{ kN}$

$$N_g = \frac{F}{\phi} n N_o = \frac{0,35}{1,4} \times 1 \times 112,795 = 28,20 \text{ kN}$$

> 20 (OK)

Baut menerima kombinasi beban geser dan tarik:

$$N_g = \frac{F}{\phi} n (N_o - 1,7T)$$

$$T = \frac{1}{2} H = \frac{60}{2} = 30 \text{ kN}$$

$$N_g = \frac{0,35}{1,4} \times 1 \times (112,795 - 1,7 \times 30) = 15,45 \text{ kN}$$

> 30 kN (tidak cukup)

Baut diperbesar lagi:

Dipakai BMT M20 mempunyai $N_o = 176,249 \text{ kN}$

$$N_g = \frac{0,35}{1,4} \times 1 \times (176,249 - 1,7 \times 30) = 31,56 \text{ kN}$$

> 30 kN (OK)

Kontrol N_t :

$$T = 30 \text{ kN}$$

$$N_t = 0,6 N_o = 0,6 \times 176,245 = 105,75 \text{ kN}$$

$N_t > T$ (OK)

-ooOoo-

PELAT SIMPUL

Pelat simpul dipakai untuk mengikat batang-batang dari konstruksi rangka. Jadi fungsi dari pelat simpul adalah sebagai stabilisator dari batang-batang yang bertemu pada titik simpul.

Syarat-syarat pelat simpul ialah:

1. Cukup lebar, sehingga semua baut dan paku keling dapat dipasang menurut peraturan-peraturan yang ditentukan.
2. Cukup kuat menerima beban dari batang-batang yang diikatkan padanya.
3. Tidak terjadi kerja takikan (kerfwerking).

ad1. Pelat simpul harus cukup lebar

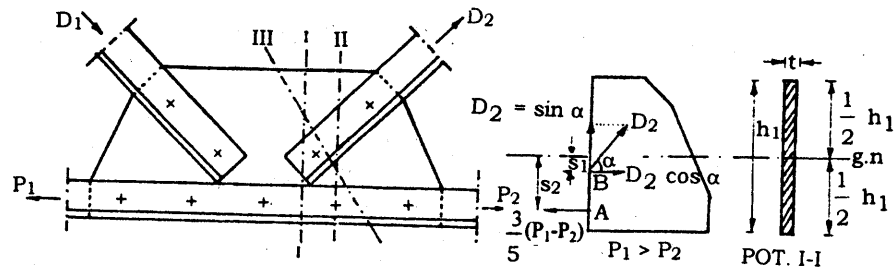
Hal ini tergantung pada jumlah baut atau paku keling yang dibutuhkan oleh tiap-tiap batang yang disambung.

ad2. Pelat simpul harus cukup kuat

Dilakukan dengan memeriksa potongan pelat simpul. Paling sedikit diadakan dua buah potongan. Ada dua kemungkinan pada rangka batang mengenai batang tepinya, yaitu:

- a. kemungkinan pertama, batang tepi menerus.
- b. kemungkinan kedua, batang tepi terputus di titik simpul.

c. Batang tepi yang menerus seperti contoh berikut ini:



Tinjau potongan I-I:

Gaya $P_1 > P_2$. Jadi arah gaya $(P_1 - P_2)$ ke kiri dan gaya ini diterima oleh 5 buah paku keling/baut.

Pada potongan I-I, gaya yang telah diterima oleh pelat simpul sebesar $\frac{3}{5} (P_1 - P_2)$. Pada potongan I-I gaya yang telah diterima oleh pelat simpul sebesar D_2 .

Tampak gaya-gaya $\frac{3}{5} (P_1 - P_2)$ dan D_2 bekerja eksentris terhadap garis netral potongan pelat simpul sehingga penampang pelat simpul menerima momen sebesar $\frac{3}{5} (P_1 - P_2) S_2 - D_2 \cos \alpha S_1$.

Pada potongan I-I timbul tegangan: $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{W}$

Jadi pada potongan I-I timbul tegangan:

$$\sigma = \frac{\frac{3}{5} (P_1 - P_2)}{t h_1} - \frac{D_2 \cos \alpha}{t h_1} \pm \left[\frac{\frac{3}{5} (P_1 - P_2) S_2}{\frac{1}{6} t h_1^2} - \frac{D_2 \cos \alpha S_1}{\frac{1}{6} t h_1^2} \right]$$

Komponen vertikal dari D_2 ialah $D_2 \sin \alpha$, menimbulkan tegangan geser sebesar:

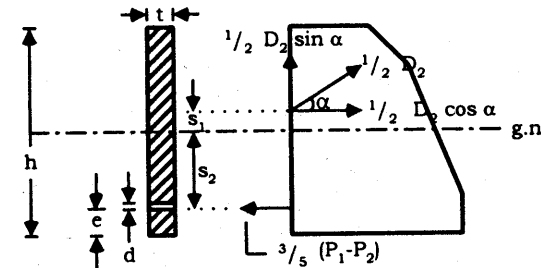
$$\tau = \frac{D_2 \sin \alpha}{t h_1}$$

Jadi pada penampang I-I terjadi:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} < \bar{\sigma}$$

Ditinjau potongan II-II:

Potongan II-II melalui sebuah paku keling/baut. Di sini penampang ada pengurangan luas lubang dengan ϕ paku keling/baut = d



Di sini garis netral tidak di tengah-tengah penampang karena adanya lubang d . Dicari dulu garis netralnya sebagai berikut: Dihitung statis momen terhadap garis paling bawah berjarak e dari lubang.

$$h t x \frac{1}{2} h - d t x e = x (h t - d t)$$

$$x = \frac{\frac{1}{2} h^2 t - d e t}{h t - d t}$$

Setelah diketahui tempat garis netral dapat dihitung tegangan yang terjadi pada penampang II-II.

Pada penampang II-II terjadi tegangan geser:

$$\tau = \frac{\frac{1}{2} D_2 \sin \alpha}{t h}$$

Pada penampang II-II juga terjadi tegangan normal sebesar:

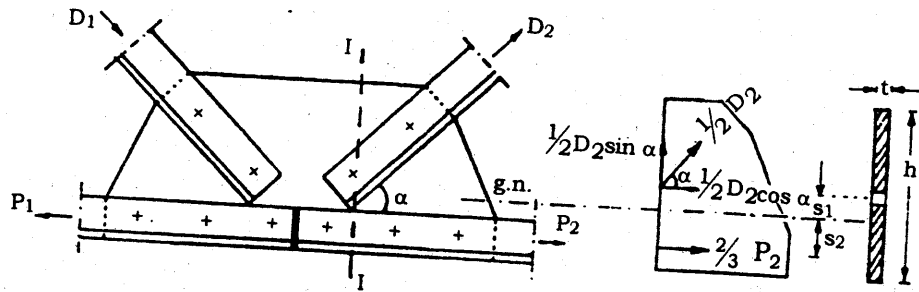
$$\sigma = \frac{\frac{3}{5} (P_1 - P_2) - \frac{1}{2} D_2 \cos \alpha}{t h} \pm \left[\frac{\frac{3}{5} (P_1 - P_2) S_2}{W_n} + \frac{\frac{1}{2} D_2 \cos \alpha S_1}{W_n} \right]$$

Catatan: W_n adalah W terhadap garis netral

Pada penampang II-II terjadi tegangan:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

b. Bila batang bawah tidak menerus, melainkan terputus di titik simpul seperti gambar di bawah ini:



Pada penampang I-I timbul:

$$\tau = \frac{1/2 D_2 \alpha}{t h} \quad \text{dan}$$

$$\sigma = \frac{2/3 P_2 + 1/2 D_2 \sin \alpha}{t h} \pm \left[\frac{2/3 P_2 S_2}{W_n} + \frac{1/2 D_2 \cos \alpha S_1}{W_n} \right]$$

Pada penampang II-II timbul:

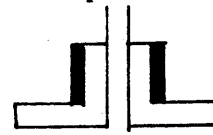
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

Bila terjadi bahwa $\sigma_i > \bar{\sigma}$ maka usahakan:

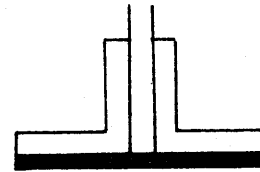
1. Tebal pelat simpul (t) diperbesar.
2. h dipertinggi, tetapi ini terbatas pada syarat-syarat jarak paku keling/baut.
3. Menambah pelat pada sambungan.

Yang biasa dikerjakan adalah cara ketiga, yaitu dengan:

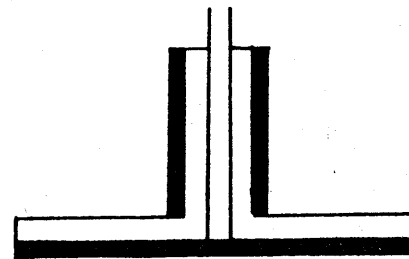
- Menambah pelat samping.



- Menambah pelat di bawah.

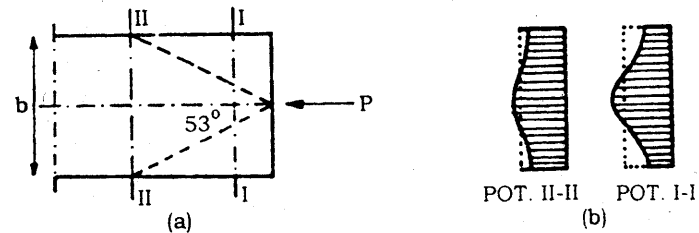


- Kombinasi dari kedua cara di atas.



ad3. Tidak terjadi takikan pada pelat simpul

Syarat ketiga yang harus dipenuhi oleh pelat simpul ialah tidak terjadinya takikan (kerfwerking). Hal ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 17.1

Kalau suatu pelat mendapat gaya seperti pada gambar di atas, maka gaya itu berangsur-angsur akan menyebar dengan cepat seperti tergambar (Gambar 17.1a).

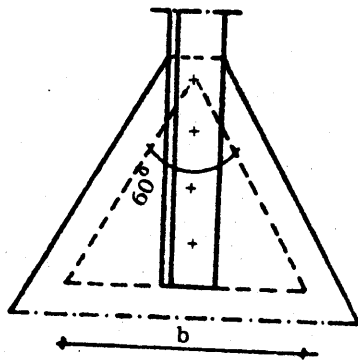
Untuk penampang yang letaknya dekat titik tangkap gaya, maka gaya itu menyebar membentuk sudut $\pm 53^\circ$.
(Gambar 17.1a)

Pada potongan I-I diagram tegangannya tidak merata.
(Gambar 17.1b)

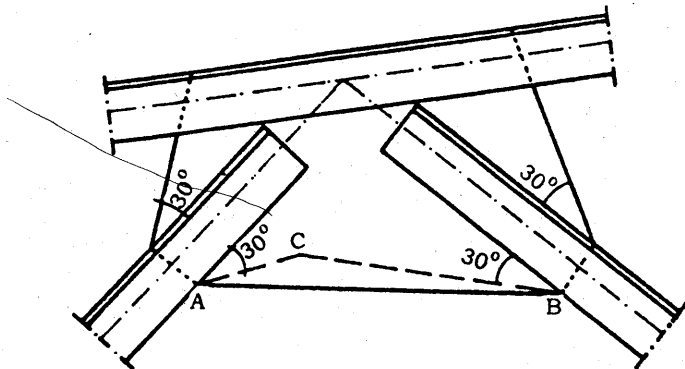
Pada potongan II-II diagram tegangannya dapat dianggap merata.
(Gambar 17.1b)

Peristiwa ini terjadi pada setiap paku keling/baut pada waktu memindahkan gaya pada pelat simpul. Oleh sebab itu gaya batang menyebar melalui b, tidak melalui lebar pelat.

Hal ini dianjurkan untuk dipakai sebagai pedoman untuk memberi bentuk pelat simpul dengan sudut penyebaran tidak kurang dari 60° , seperti gambar di bawah ini:



Dianjurkan juga untuk membuat pelat simpul yang tidak mempunyai sudut ke dalam agar tidak merobek pelat. Lihat gambar berikut ini:



Pada titik C di sini terjadi kerja takikan. Hal ini tidak boleh. Karenanya A dan B dihubungkan lurus.

Cara menggambar pelat simpul:

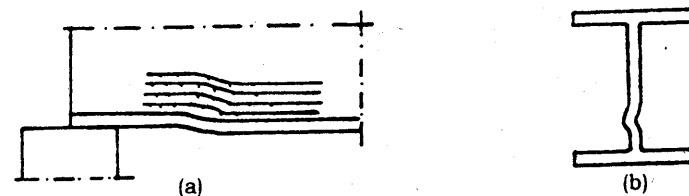
Setelah jumlah paku keling/baut dihitung:

1. Gambarlah garis sistem (garis pusat berat penampang) bertemu pada satu titik.
2. Gambarlah batang-batang sepenuhnya. Batang-batang diteruskan sejauh mungkin.
3. Tentukan penempatan paku keling/baut sesuai peraturan
4. Buatlah batas-batas akhir paku keling/baut pada setiap batang.
5. Tariklah garis-garis batas pelat simpul dengan catatan bahwa batas-batas tersebut tidak boleh membentuk sudut kurang dari 60° pada setiap batang dan jangan terjadi kerja takikan.

-ooOoo-

WEB BUCKLING DAN WEB CRIPPLING

Web buckling adalah suatu distorsi pada badan balok yang keluar dari bidangnya, yang dihasilkan dari suatu kombinasi dari ratio d/t_w yang besar dan tegangan lentur. Panjang yang tidak dibrace pada sayap yang tertekan dapat juga memberi kontribusi pada web buckling. Web buckling dikontrol oleh batasan baik dari ratio d/t_w maupun dari tegangan yang dapat digunakan bagi ratio d/t_w yang diketahui. Hal ini diijinkan pada beberapa spesifikasi. Web buckling dilukiskan pada Gambar 18.1 di bawah ini.



(a)
(a) Web crippling

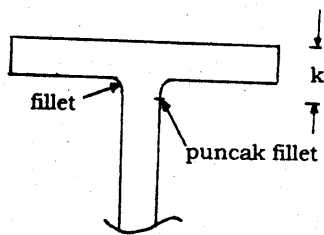
(b)
(b) Web buckling

Kehancuran badan yang dicegah dalam desain

Gambar 18.1

Web crippling dapat terjadi bila tegangan tekan dalam bidang badan cukup besar. Hal ini dapat terjadi jika jarak-jarak reaksi atau pelat-pelat pendukung beban yang dipakai untuk mengalihkan beban-beban kolom ke sayap terlalu sempit. Web crippling dapat pula terjadi jika beban terbagi rata di atas sayap terlalu besar bagi tebal badan. Kontrol dari Web crippling akan diperoleh dengan menentukan jarak reaksi yang diperlukan atau lebar pelat kaki kolom dengan cara sebagai berikut:

Jarak yang diperlukan diperoleh dengan mempertimbangkan suatu luasan pada badan yang tertekan dibatasi oleh panjang reaksi + satu jarak tambahan dengan menggunakan slope 1:1 (45°) sepanjang jarak k pada penampang melintang balok. Harga k ini dapat diperoleh pada tabel profil baja yang dibentuk secara hot rolled. Nilai k ini diukur dari permukaan sayap ke puncak dari fillet.



Pada lokasi ini hasil dari luas badan yang tertekan hampir minimum. Pada suatu reaksi luas dari badan yang tertekan ialah:

$$A_c = (N + k) t_w$$

Tegangan yang diijinkan pada lokasi ini menurut AISC ialah:

$$F_a = 0,75 F_y \quad (F_y = \text{tegangan leleh})$$

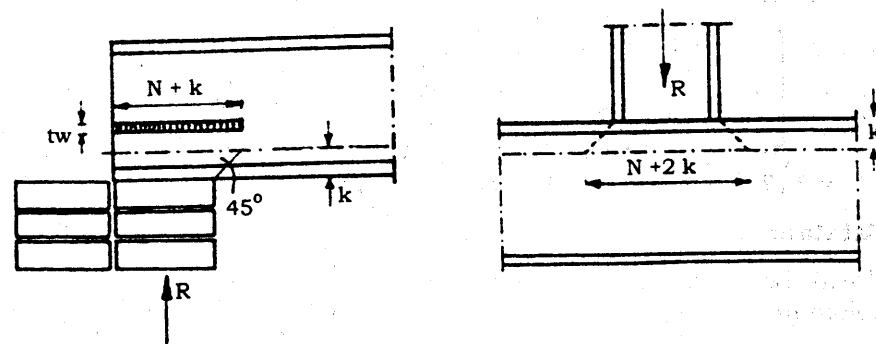
Pada suatu reaksi dengan $f_c = \frac{R}{A_c}$ diperoleh:

$$\frac{R}{(N + k) t_w} \leq 0,75 F_y$$

di mana:

N = lebar reaksi = nilai dasar dari bagian tebal tembok sebagai tumpuan = $3\frac{1}{2}$ in atau 89 mm.

R = reaksi atau beban sentris lainnya dalam kips atau kN



Gambar 18.2

Panjang dukung bagi beban-beban sentris pada balok menurut AISC

t_w = tebal badan, in atau mm

$k (N = 2k) + w \leq 0,75 F_y$ = jarak dari muka sayap ke fillet toe, in atau mm

Jika beban terbagi rata yang besar dipikul melalui sayap kepada badan, maka perlu dikontrol tegangan tekannya f_c dan dibatasi harganya oleh:

$$f_c \leq 0,75 F_y$$

Contoh

Berapa reaksi yang diijinkan bagi W16 x 40 dengan menggunakan harga dasar dari $N = 3\frac{1}{2}$ in = 89 mm, jika dipakai baja A36?

Berapa besarnya beban kolom yang dapat dipindahkan bila menggunakan W8 x 31?

Jawab

Dari tabel profil baja di AISC Edisi 9 diketahui untuk W16 x 40:

$$k = 1\frac{1}{8} \text{ in} = 28,575 \text{ mm}$$

$$t_w = 0,305 \text{ in} = 7,747 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar standar } N = 89 \text{ mm}$$

$$R = (N + k) t_w (0,75 F_y)$$

$$R = (89 + 28,575) (7,747) (10^{-3}) (0,75 \times 248)$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{tegangan leleh A36} = 36 \text{ ksi} \\ \quad \quad \quad = 36 \times 6,89476 \text{ Mpa} \\ \quad \quad \quad = 248 \text{ Mpa} \end{array} \right]$$

$$= 117,575 \times 0,007747 \times 186 = 169,4 \text{ kN}$$

Catatan: MPa x mm² x 10⁻³ = kN

Untuk beban kolom, lebar kolom W8 x 31 dibatasi = tinggi profil kolom (d = 8 in = 203,2 mm) = N

$$P = (N + 2k) (t_w) (0,75 F_y)$$

$$= (203,2 + 2 \times 28,575) (7,747) (10^{-3}) (0,75 \times 248)$$

$$= 260,35 \times 0,007747 \times 186 = 375 \text{ kN}$$

Catatan:

1. Bila memakai balok W16 x 40, maka balok harus dibebani sedemikian rupa sehingga menghasilkan reaksi perletakan tidak lebih dari 169,4 kN.
2. Bila balok W16 x 40 dibebani kolom dari W8x31, maka beban kolom maksimum ialah 375 kN.
3. Jika pada keadaan 1 dan 2 beban maksimum dilampaui, maka perlu diberi pengaku pada badan balok di atas perletakan pada keadaan 1 dan di bawah kolom W8 x 31 pada badan balok diberi pengaku (keadaan 2).

Catatan: Untuk merencanakan pengaku-pengaku ini, lihat buku yang membahas soal Plate Girders.

Sambungan antara Kolom dan Balok yang Rigid

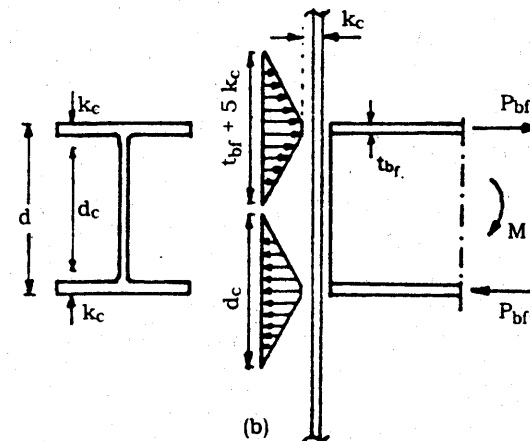
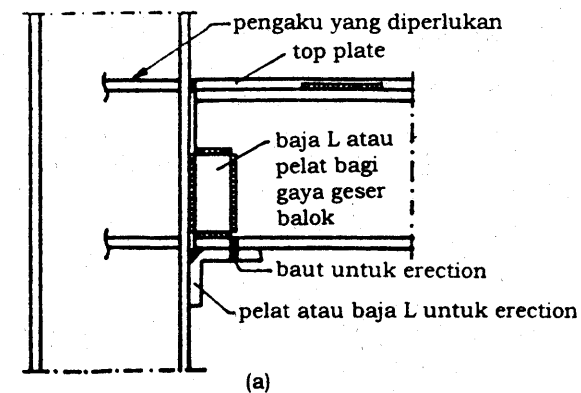
Sambungan yang rigid bagi kolom dan balok dapat mudah dibuat dengan menggunakan las. Dalam kebanyakan sambungan yang rigid secara praktis ialah dengan mengelas badan dari balok atau dalam kombinasi dengan suatu pelat atau baja L untuk mendukung gaya geser.

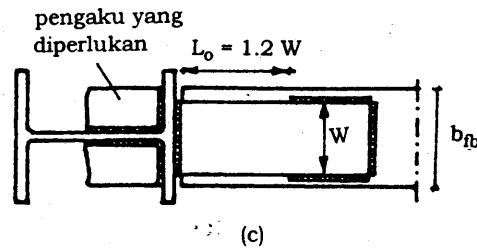
Desain ini selanjutnya dianggap sebagai tidak ada gaya geser yang dipikul oleh las-las sayap dan menghindari penggunaan perhitungan tegangan kombinasi. Jadi di sini badan balok me-

mikul gaya geser dan sayap-sayap memikul momen. Asumsi ini adalah tepat dan bekerja baik dalam praktek.

Bila menggunakan top plate (pelat atas) tidak boleh dilas pada sayap di daerah kira-kira $L_o = 1,2 \times$ lebar pelat sedemikian, sehingga pengaruh *shear lag* tidak menyebabkan tegangan-tegangan lokal yang tinggi dan tidak menimbulkan kegagalan pada pelat atau las. Pengaku-pengaku mungkin diperlukan terhadap tarikan dan/atau tekanan sayap-sayap dari balok yang memindahkan beban ke kolom.

Pada potongan di sini apakah perlu ditentukan perlunya pengaku dari badan kolom dan sayap.





Gambar 18.3

Sambungan las antara kolom dan balok yang rigid

Gambar 18.3:

- (a) Sambungan yang rigid
 (b) Daerah tegangan dari badan kolom
 (c) Top plate dari pengelasan

Menurut persamaan AISC [Eq.(1.15-2)]:

$$d_c \leq \frac{10,73 t_w^3 \sqrt{F_y}}{P_{bf}} \quad (\text{berdasarkan SI}) \quad (1)$$

di mana:

P_{bf} = gaya tekan sayap balok x F

F = $\frac{5}{3}$ untuk beban mati dan hidup dan $\frac{4}{3}$ bagi beban mati + beban hidup + beban angin dalam kN

t_w = tebal

badan kolom dalam mm

d_c = tinggi penampang badan kolom yang diperlukan sebagai d - 2k dalam mm

F_y = Tegangan leleh dari kolom baja dalam MPa

Suatu pengaku diperlukan berlawanan dengan sayap yang tertekan bila d_c yang sebenarnya pada kolom adalah lebih besar dari hasil d_c pada rumus (1).

Pengaku (bagi badan kolom) diperlukan berlawanan terhadap sayap yang tertarik dari balok (lihat Gambar 18.3b) sebagai berikut:

$$P_{bf} \leq F_{yc} t_w (t_{bf} + 5k_c)$$

Bila $P_{bf} \leq F_{yc} t_w (t_{bf} + 5k_c)$ tidak diperlukan pengaku kolom.

Cara yang lebih enak untuk menentukan pengaku yang diperlukan ialah sebagai berikut:

$$P_{sf} + P_{cw} = P_{bf}$$

di mana:

P_{sf} = gaya pada pengaku

P_{cw} = gaya pada badan kolom

dengan $P_{st} = A_{st} F_{yst}$ diperoleh:

$$A_{st} = \frac{P_{bf} - F_{yc} t_w (t_{bf} + 5k_c)}{F_{yst}} \quad (2)$$

di mana:

F_{yst} = tegangan leleh dari pengaku

Ini adalah persamaan dalam AISC yang terbaru edisi ke-9 bagi pengaku kolom yang berlawanan dengan sayap balok yang tertarik.

Catatan: Hanya pengaku positif yang berlaku.

Sayap kolom harus mempunyai tebal yang cukup untuk menahan tarikan dari sayap balok tanpa terjadinya deformasi yang membahayakan. Analisis yield line telah memberikan persamaan sebagai berikut:

$$t_{cf} < 12,7 \left(\frac{P_{bf}}{F_{yc}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{berdasarkan SI}) \quad (3)$$

Bila kekuatan sayap kolom t_{cf} kurang dari term kedua persamaan (3), diperlukan pengaku sayap. AISC specification memerlukan bahwa setiap pengaku badan atau sayap kolom memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. $A_{st} \geq$ persamaan (1) jika persamaan ini yang dipakai.
2. Lebar dari kedua pengaku + $t_w \geq 0,67 b_{fb}$.
3. Tebal pengaku-pengaku $t_s \geq t_{fb} / 2$ (juga ratio b/t harus cukup).

4. Bagi balok pada satu sisi terhadap kolom, pengaku-pengaku boleh diperpanjang hanya setengah dari tinggi penampang kolom.
5. Sambungan las antara pengaku dengan badan kolom harus berukuran untuk memikul unbalanced moments pada masing-masing sisi dari kolom.
6. Pengaku-pengaku bagi keperluan tarikan harus dilas pada sayap kolom cukup untuk memikul Ast. Fyst (misalnya menggunakan full penetration butt welds).
7. Pengaku tekanan harus dilas atau diikat secara akurat pada sayap kolom berlawanan dengan sayap balok yang memberikan beban tekan.

-ooOoo-



DAFTAR PUSTAKA

- Centrum Bouwen in Staal*; Staal Centrum Nederlands: Boutkrachten - tabellen.
- Elementary Structural Design of Steelwork to BS 449*; P.C.L. Croxton, L.H. Martin, J.A Purkiss.
- Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*; John W. Fisher, John H.A. Struik.
- Konstruksi Baja*; Ir. Potma, Ir. J.E. De Vries.
- Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI) 1983*. American Institute of Steel Construction (AISC) s/d edisi 9.
- Steel Structures Design and Behavior*, Charles G. Salmon, John E. Johnson.
- Stabiliteit voor de Staalconstructie*
- Structural Steel Design*; Joseph E. Bowles.
- Staalconstructies deel I*; G. May Ing. Ir. M.E.A. Striekwold.
- Steel Designers Handbook*; B.E. Goreng, R.Tinyou.
- Tabel Profil Konstruksi Baja*.