BAB II
LANDASAN TEORI

2.1 Bangunan Struktur Baja

Struktur rangka baja merupakan salah satu tipe yang dituangkan dalam pedoman pembangunan bangunan tahan gempa, walaupun dalam penggunaannya banyak dimanfaatkan sebagai bangunan *warehouse* dan kilang minyak. Padahal sebagai konstruksi *prefabrikasi*, penggunaan jenis .struktur ini memiliki beberapa keuntungan seperti kepraktisan dan kecepatan dalam pelaksanaan konstruksi serta kualitas bahan yang terkontrol. Material utama yang digunakan yakni material baja yang memiliki kekuatan tinggi, keseragaman dan keawetan yang mumpuni, memiliki sifat elastisitas, daktilitas pada baja cukup tinggi, serta kemudahan dalam penyambungan kontruksi (Agus Setiawan, Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD, 2008).

2.1.1 Sifat Mekanik Baja

Baja sebagai salah satu material pada konstruksi bangunan memiliki beberapa sifat fisik dan mekanis yang dapat mempengaruhi kekuatan pada sebuah konstruksi bangunan (Agus Setiawan, Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD, 2008). berikut ini adalah sifat mekanis yang ada pada material baja:

a. Kekakuan (*Stiffness*) Yaitu sifat suatu material yang dapat renggang pada saat menerima tegangan yang tinggi tanpa diikuti oleh regangan yang besar, sifat ini merupakan kemampuan material dalam menahan deformasi. Kekakuan bahan yaitu berupa modulus elastisitas (E), sebuah material yang mempunyai modulus elastisitas yang tinggi dapat berdeformasi lebih kecil pada saat menerima beban, baja sendiri memiliki modulus elastisitas (E) sebesar E = 200.000 MPa.

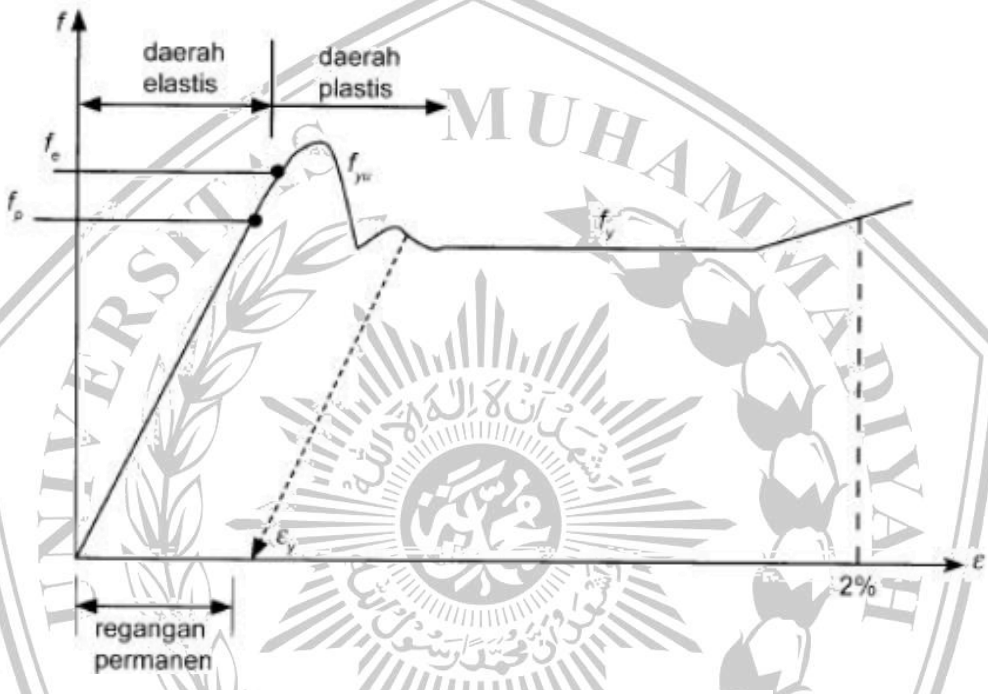
b. Kapabilitas (*Strength*) Sifat suatu bahan yang ditentukan oleh tegangan pada material dapat merenggang sebelum mengalami kegagalan (*failure*). Kapabilitas didefinisikan oleh batas proporsional, titik lentur atau tegangan maksimum.

c. Elastisitas Elastisitas adalah suatu sifat material yang dapat kembali pada bentuk awal setelah diberikan beban.

d. Daktilitas Sifat suatu bahan yang dapat berdeformasi pada beban tarik sebelum material benar – benar patah (*rupture*).

e. Kegetasan Kegetasan adalah tak adanya deformasi plastis pada material sebelum rusak, atau material yang rusak tanpa adanya tanda – tanda kerusakan terlebih dahulu.

f. Kelenturan Kelenturan adalah sifat suatu material yang dapat menahan beban yang tinggi tanpa memunculkan tegangan lebih pada batas elastis.



Gambar 2. 1 Diagram Tegangan – Regangan

Sumber: Struktur Baja SNI 1729-2020 Edisi Pertama, Yudha Lesmana.

Titik – titik yang ada pada kurva antara lain :

fp : batas proporsional

fe : batas elastis

fyu, fy : tegangan leleh atas dan bawah

εy : regangan pada saat terjadi efek *strain – hardening* (penguatan regangan)

Kekuatan Material ekspetasi

Tegangan leleh ekspetasi

Ry Fy

Tegangan Tarik ekspetasi

Rt Fu

Dimana :

Fy : tegangan leleh minimum menurut spesifikasi

Ft : tegangan tarik minimum menurut spesifikasi

Ry = $\frac{\boldsymbol{Fye}}{\boldsymbol{Fy}} = \frac{\boldsymbol{Teg.leleh\ real}}{\boldsymbol{teg.leleh\ nominal}}$ ……..(2.1a)

Rt = $\frac{Fuy}{Fu} = \frac{Teg.ultimit\ real}{teg.ultimit\ nominal}$ .....(2.1b)

Ry : Rasio tegangan leleh ekspetasi terhadap tegangan leleh minimum, Fy

Rt : Rasio Kuat Tarik ekspetasi terhadap kuat Tarik minimum, Fu

2.2 Sistem Struktur Baja Tahan Gempa

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa sangat penting di Indonesia, yang sebagian besar wilayahnya memiliki kerawanan yang tinggi terhadap gempa. Standar dan peraturan yang berlaku pada perencanaan bangunan diperlukan untuk desain struktur tahan gempa untuk menjamin keselamatan penghuni dan meminimalisir kerusakan struktur bangunan akibat gempa. Struktur bangunan tahan gempa harus memiliki kekuatan, kekakuan dan stabilitas yang cukup untuk mencegah terjadinya kegagalan pada bangunan.

Berdasarkan sudut pandang rekayasa sipil terhadap perencanaan struktur bangunan tahan gempa, beberapa kriteria atau persyaratan yang harus dipunyai oleh material dari struktur agar mampu untuk menahan pengaruh beban gempa. Perilaku dari elemen-elemen struktur bangunan terhadap pengaruh gempa tidak dapat dievaluasi hanya dari segi material saja. Faktor-faktor lain seperti kontinuitas sambungan, keseragaman kekakuan, dan detail struktural, harus ikut pula diperhitungkan di dalam mengevaluasi sistem struktur secara keseluruhan, agar tahan terhadap pengaruh gempa.

Struktur baja sangat sesuai digunakan untuk bangunan bertingkat tinggi (*highrise building*), karena material baja mempunyai kekuatan serta tingkat daktilitas yang tinggi dibandingkan dengan material-material struktur lainnya. Sifat daktail diperlukan agar struktur mampu mengalami deformasi atau perubahan bentuk secara daktail dengan cara memencarkan energi gempa dan membatasi gaya

gempa yang masuk ke dalam struktur. Selain itu material baja mempunyai kekuatan tarik dan kekuatan tekan yang sama besar, sehingga sangat sesuai digunakan sebagai elemen struktur yang memikul beban dinamik yang berarah bolak-balik (Siswanto & Salim, 2018)

2.2.1 Sistem Portal kaku (*Rigid Frame*)

a. *Special Moment Frame* atau Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus.

Special Moment Frame (SRPMK) untuk bangunan tinggi, biasanya digunakan sistem penahan lateral khusus seperti rangka pemikul momen khusus dan dinding struktural khusus. Rangka pemikul momen khusus merupakan elemen balok dan kolom yang mampu mendisipasi energi saat terjadi gempa kuat. *Special Moment Frame* (SMF) atau struktur dengan tingkat daktilitas penuh. Struktur ini dapat digunakan untuk kategori desain seismik D, E dan F. (Patrisko Hirel Karisoh, Servie O. Dupas, 2018).

b. Intermediate Moment Frames

Intermediate Moment Frames (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah) yaitu sistem rangka ruang dimana komponen-komponen struktur dan joint-jointnya menahan gaya yang bekerja melalui aksi lentur, geser dan aksial, sistem ini pada dasarnya memiliki daktilitas sedang dan dapat digunakan di zona 1 hingga zona 4 (Tajunnisa et al., 2014).

c. Ordinary Moment Frames

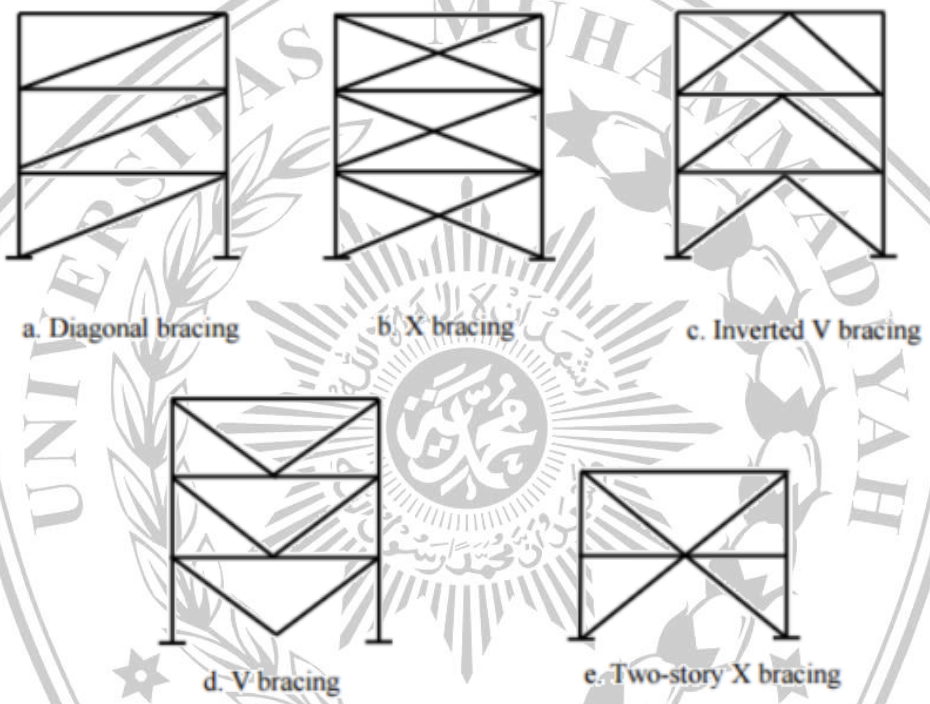
Ordinary moment frames (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa) adalah tipe rangka yang memiliki tingkat daktilitas terbatas dan hanya cocok digunakan pada bangunan dengan kategori *seismic* B. Oleh sebab itu hanya bisa digunakan pada sistem struktur dengan beban gravitasi yang dominan, misal bangunan tidak bertingkat yang memiliki bentang panjang dan lebar. (Irianti & Karlinah, 2021).

2.2.2 Sistem Rangka Bracing

a. *Special Concentrically Braced Frames* (SCBF)

Sistem Rangka Bresing Konsentrik merupakan pengembangan dari sistem portal tak berpengaku atau lebih dikenal dengan Sistem Rangka Pemikul Momen. sistem rangka bresing konsentrik dikembangkan sebagai sistem penahan gaya lateral dan memiliki tingkat kekakuan yang cukup baik. Hal ini bertolak belakang

dengan sistem sistem rangka pemikul momen yang hanya bisa digunakan sebagai penahan momen. Kekakuan sistem ini terjadi akibat adanya elemen pengaku yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral yang terjadi pada struktur. Sistem ini penyerapan energinya dilakukan melalui pelelehan yang dirancang terjadi pada pelat buhul. SCBF digunakan di daerah seismik dengan kategori resiko tinggi dikarenakan struktur yang efisien, Kekakuan elastisitas SCBF jauh lebih tinggi daripada sistem lateral baja lainnya dengan sebagian besar pengaku lateral dan disediakan melalui bresing untuk menahan respon aksial (Syamsu et al., 2021)**.**



Gambar 2. 2 Tipe Rangka Bresing Konsentrik

Sumber: Struktur Baja SNI 1729-2020 Edisi Pertama, Yudha Lesmana.

Bresing adalah elemen struktur tambahan yang dipergunakan apabila hendak menjadikan struktur portal lebih kaku (tidak bergoyang). Bresing direncanakan memikul beban aksial yang dapat menyebabkan tarik dan tekan. Pada saat terjadi gempa, bresing memiliki dua kemungkinan perilaku yakni perilaku tekuk akibat tekan dan leleh atau fraktur akibat tarik. Ada berbagai macam pemasangan bresing diantarnya adalah *Single Diagonal Braced, Two Story X-Bracing, V- Bracing dan Inverted V-Bracing*.

b. *Ordinary Concentrically Braced Frames* (OCBF)

Bekerja seperti sistem SCBF, namun untuk struktur OCBF digunakan di daerah seismik dengan kategori resiko gempa rendah.

c. *Eccentrically Braced Frames* (EBF)

Konsep desain *Eccentrically Braced Frames* (EBF) adalah dengan membatasi aksi inelastis pada link, dan mendesain kerangka di sekitar link untuk mempertahankan tegangan maksimum yang dapat diberikan oleh link. EBF mengkombinasikan banyak keuntungan individu dari sistem kerangka konvensional, secara spesifik, EBF memiliki elastisitas tinggi, respons inelastis stabil pada muatan lateral siklis, daktilitas dan kapasitas dispasi energi yang besar (Manope et al., 2019)

2.3 Metode LRFD

Metode LRFD *(Load Resistance Factor Design)* adalah spesifikasi yang dikeluarkan oleh AISC (*America Instate of Steel Construction)* untuk desain konstruksi baja, LRFD pada dasarnya adalah mirip dengan ASD *Strength*, membandingkan beban (Q) atau gaya dalam terhadap tahanan atau kekuatan (Rn). Konsep LRFD ini pada prinsipnya dimana beban yang bekerja harus lebih kecil dari kapasitas kekuatan elemen dibagi dengan suatu faktor keamanan *safety factor*.

Kondisi batas adalah suatu kondisi yang menunjukkan batas kemampuan suatu struktur agar bisa digunakan. Kriteria perencanaan memastikan bahwa kondisi batas harus kecil kemungkinan terlampaui, caranya dengan memilih kombinasi gaya, faktor tahanan dan nilai ketahanan yang tidak akan melampaui batas kemampuan suatu struktur berdasarkan kriteria perencanaan yang ada. Ada dua jenis kondisi batas yang diterapkan pada struktur, yaitu:

1. Kondisi batas kekuatan (*ultimate strength*), kondisi yang berhubungan dengan kegagalan akibat kombinasi beban terburuk muncul pada struktur. Konsep desain batas kekuatan sebagai berikut.

   Kuat nominal ≥ kuat perlu

   Nilai kuat perlu didapat dari reaksi maksimum yang terjadi akibat beban yang diterima seperti momen lentur (Mu), gaya geser (Vu), gaya torsi (Tu), gaya normal/aksial (Pu). Jenis utama dari kondisi batas kekuatan adalah keruntuhan plastis, stabilitas terhadap goyangan, guling (*overturning*), dan pergeseran

(*sliding*), dan kelelehan (*fatigue*)

2. Kondisi batas layan yang menetapkan batasan-batasan agar struktur dapat berfungsi sesuai yang direncanakan. Konsep dari desain batas layan yaitu :
   Perilaku struktur yang diizinkan ≥ perilaku struktur yang terjadi
   Jenis utama dari kondisi batas layan adalah lendutan (*defleksi*), retak (*crack*), dan getaran (*vibration*).

Dalam merencanakan struktur baja dengan menggunakan metode LRFD, perencanaan difokuskan pada beban tidak boleh lebih besar daripada kekuatan atau tahanan, hal ini tidak ada kondisi batas yang melampaui. ØRn berarti tahanan rencana dari komponen struktur bangunan, sedangkan $\gamma i.Qi$ berarti beban yang harus dipikul struktur bangunan. Sehingga tahanan harus lebih besar dari beban agar sebuah struktur bangunan aman. Pernyataan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$ØRn \geq \sum \gamma_i Q_i$ .....(2.2a)

Dimana:

∑ = Penjumlahan

i = menunjukan berbagai kondisi

Qi = pengaruh beban nominal

Yi = faktor beban terkait beban *Qi* yang ditinjau

Yi Qi = kuat perlu, dari kondisi batas yang paling ekstrim

Rn = kuat nominal, kekuatan elemen yang dihasilkan

Ø = faktor tahanan sesuai jenis struktur yang di tinjau

ØRn = kuat rencana, kekuatan struktur yang direncanakan

Desain LRFD sebenarnya memberikan hasil desain yang lebih optimum karena telah mempertimbangkan interaksi antara kekuatan material dan beban. Dimana ruas kiri mewakili resistensi (kekuatan) dari komponen atau sistem, sedangkan ruas kanan mewakili beban yang diharapkan akan ditanggung sehingga cenderung memberikan struktur yang lebih aman, Pada sisi kekuatan harga nominasi resistensi Rn dikalikan dengan faktor resistensi (reduksi kekuatan) Ø untuk mendapatkan kekuatan desain. Pada sisi beban berbagai efek beban Qi (seperti beban mati, beban hidup, dan beban lingkungan) dikalikan dengan faktor-faktor kelebihan beban γi untuk mendapatkan jumlah ∑ γi Qi dari beban-beban

terfaktor. (Agus Setiawan, Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD, 2008)

2.3.1 Ketentuan LRFD

Perencanaan bangunan baja sesuai dengan SNI 1729-2020 Spesifikasi baja untuk bangunan gedung, desain struktur dibuat berdasarkan desain faktor beban dan ketahanan (DFBK) atau Desain kekuatan ijin (DKI). Ketentuan DFBK atau LRFD diangap memenuhi syarat apabila kuat perlu, Ru lebih kecil dari kuat rencana, ØRn dengan Ø adalah faktor tahanan yang nilainya bervariasi tergantung perilaku aksi komponen yang ditinjau. Jadi konsep dasar ketentuan LRFD adalah:

$Ru \leq ØRn$.....(2.2b)

Keterangan :

Ru = Kuat Perlu dengan menggunakan kombinasi beban LRFD

Rn = kuat nominal, kekuatan elemen yang dihasilkan

Ø = faktor tahanan sesuai jenis struktur yang di tinjau

ØRn = kuat rencana, kekuatan struktur yang direncanakan

Tabel 2. 1 Faktor Tahanan

Komponen Struktur	Faktor Tahanan Ø
Komponen struktur lentur	0,90
Komponen struktur tekan	0,90
Komponen struktur tarik	
• Kuat tarik untuk leleh tarik	0,90
• Kuat tarik untuk keruntuhan tarik	0,75
Sambungan baut	
• Baut yang memikul geser	0,75
• Baut yang memikul tarik	0,75
• Baut yang memikul kombinasi geser dan tarik	0,75
• Lapis yang memikul tumpu	0,75
Sambungan las	
• Las tumpul penetrasi penuh	0,90
• Las sudut dan las tumpul penetrasi sebagian	0,75
• Las pengisi	0,75

Sumber : SNI 1729:2020

2.4 Gaya Geser Dasar Akibat Gempa

Gaya geser dasar akibat gempa merupakan pengganti atau penyederhanaan dari getaran gempa bumi yang bekerja pada dasar bangunan dan selanjutnya digunakan sebagai gaya gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan Gedung. Pada SNI 1726-2019 Gaya geser dasar seismik, V, dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

V = $C_s W$

Keterangan:

Cs = koefisien respons seismik yang ditentukan sesuai dengan 0

W = berat seismik efektif menurut 0

2.5 Koefisien Respon Seismik

Pada SNI 1726-2019 disebutkan bahwa koefisien respon seismik Cs harus ditentukan dengan persamaan :

$C_s = \frac{S_{D1}}{T(\frac{R}{Ie})}$ .....(2.3)

Keterangan:

SDS = parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek seperti ditentukan dalam 0 atau 0

R = koefisien modifikasi respons

Ie = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 0.

2.6 Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Pada SNI 1726-2019 ditentukan bahwa Gaya seismik lateral, F_{x1} (kN) di sebarang tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut:

F_{x1}=$C_{vx}V$

dan

$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k}$ .....(2.4)

C_{vx} = faktor distribusi vertikal

V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)

$W_i$dan W_x = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x

$h_i$dan h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)

k = eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut: untuk struktur dengan T ≤ 0,5 detik, = 1 untuk struktur dengan T ≥ 2,5 detik, = 2 untuk struktur dengan 0,5 < T < 2,5 detik, = 2 atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

2.7 Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Pada SNI 1726-2019 disebutkan bahwa Geser tingkat desain seismik di semua tingkat, Vx (kN), harus ditentukan dari persamaan berikut:

$V_X \sum_{i=x}^{n} F_i$ .....(2.5a)

Keterangan:

F_i adalah bagian dari geser dasar seismik (V) pada tingkat ke-i (kN)

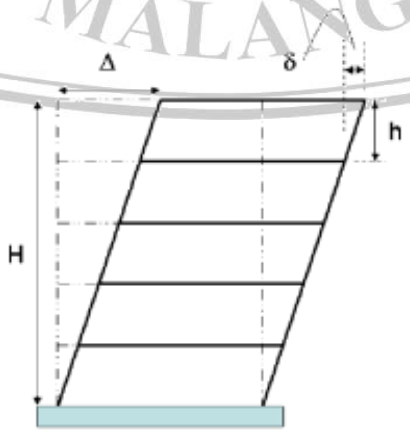
Geser tingkat desain seismik, Vx (kN), harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem pemikul gaya seismik di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen pemikul vertikal dan diafragma.

2.8 Perancanangan Stabilitas Sturktur

Perencanaan Stabilitas struktur memerlukan kombinasi antara analisa dalam menentukan kuat perlu penampang dan desain, agar struktur memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban. Dengan itu bisa dilakukan beberapa pengecekan sebagai berikut:

2.8.1 Drift Ratio

Drift Ratio merupakan perbandingan antara simpangan puncak dengan tinggi bangunan. Aman tidak bangunan ditentukan dengan besarnya nilai *drift ratio*. Semakin kecil nilai *drift ratio* menunjukan bangunan itu juga semakin aman. Batasan drift ratio secara umum bisa diambil 0,0025 atau H/400.



Gambar 2. 3 Gambar *Drift Ratio*

Dalam *drift ratio* juga dikenal kegagalan *soft storey* yang terjadi jika simpangan antar lantai pada lantai bawah lebih besar dari lantai atas. Sebaiknya drift ratio tertinggi berada pada

lantai atas. *Drift ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

Drift ratio = $\frac{\Delta\, Top}{H} \leq 0{,}0025$ .....(2.5b)

Keterangan

$\Delta\, Top$ = Displacement puncak bangunan (m)

H = Tinggi bangunan (m)

2.8.2 Simpangan Antar Tingkat

Penentuan simpangan antar tingkat desain harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada tingkat teratas dengan tingkat dibawahnya. Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.12, batasan simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi simpangan *drift* antar tingkat ijin (Δa) dengan ketentuan sebagai berikut:

batasan simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi simpangan *drift* antar tingkat ijin (Δa) dengan ketentuan sebagai berikut:

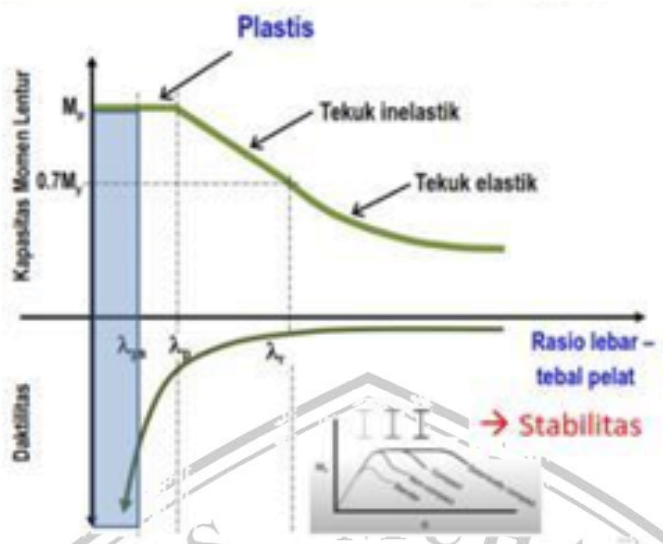
Tabel 2. 2 Batasan Simpangan Antar Tingkat

struktur	Kategori resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0{,}025h_{sx}$	$0{,}020h_{sx}$	$0{,}015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata.	$0{,}010h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0{,}007h_{sx}$	$0{,}005h_{sx}$	$0{,}007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0{,}020h_{sx}$	$0{,}015h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$

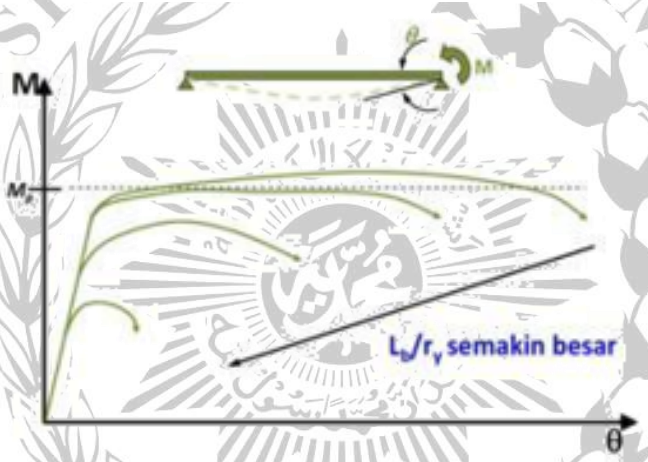
Sumber : SNI 1726:2019

2.8.3 Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur gedung untuk mengalami simpangan pasca elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup sehingga struktur gedung tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi di ambang keruntuhan.(Yudi et al., 2019)



Gambar 2. 4 Daktilitas pada penampang



Gambar 2. 5 Daktilitas pada elemen balok

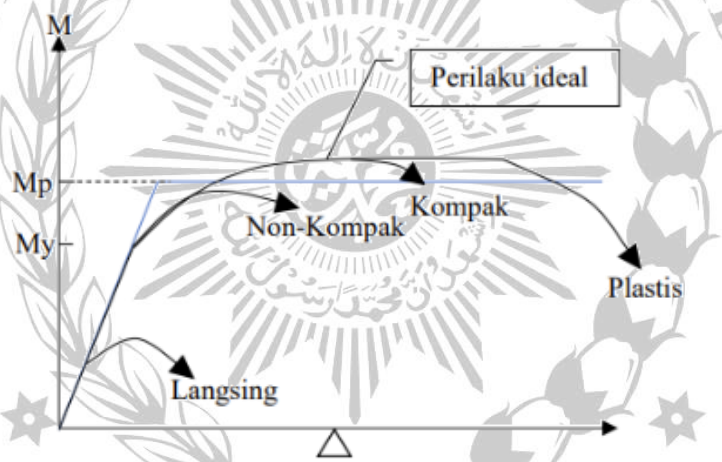
Sumber: SNI 7860-2020

Pada struktur berdeformasi berarti memanjang, memendek, dan bengkok. Faktor daktilitas suatu struktur gedung merupakan dasar bagi penentuan beban gempa yang bekerja pada struktur gedung, karena itu tercapainya tingkat yang diharapkan harus terjamin dengan baik. Hal ini dapat tercapai apabila balok harus leleh terlebih dahulu sebelum terjadi kerusakan-kerusakan pada kolom(konsep *strong coloumn weak beam*). Hal ini berarti bahwa akibat pengaruh gempa rencana, sendi-sendi plastis di dalam struktur gedung hanya berada pada ujung-ujung balok dan pada kaki-kaki kolom.(Ketut Sudarsana et al., 2015)

Pada struktur rangka akan lebih baik apabila disipasi energi gempa melalui pelelehan (sendi plastis) pada komponen balok dan kolom yang diharapkan memberikan kekuatan, kekakuan, dan kestabilan pada waktu menahan gaya-gaya yang bekerja melalui aksi lentur, geser, dan aksial.

2.9 Stabilitas Penampang Baja

Sebelum melakukan perencanaan struktur baja khususnya elemen lentur, makaperlu adanya mengetahui dahulu klasifikasi elemen - elemen penyusun profil karena akan dipakai sebagai dasar dalam perhitungan kuat lentur nominal (Mn). Penentuan klasifikasinya mengacu pada rasio lebar terhadap ketebalan elemennya (b/t atau λ). Berdasarkan pada SNI 1729:2020 yang mengacu pada AISC 2016 terdapat tiga klasifikasi profil untuk batang lentur, yaitu penampang kompak, nonkompak dan langsing. Perilaku pada setiap klasifikasi bisa dilihat sebagai berikut:



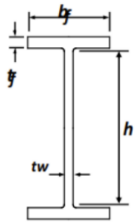
Gambar 2. 6 Perilaku Penampang Baja

1. Penampang Kompak Diklasifikasikan sebagai penampang kompak apabila semua bagian sayap dan badan menyatu dan pada elemen tekan memiliki batasan

$\lambda \leq \lambda p$

2. Penampang Nonkompak Diklasifikasikan sebagai penampang nonkompak apabila salah satu atau semua elemen bagian elemen tekan mempunyai batasan rasio

$\lambda p < \lambda \leq \lambda r$



Gambar 2. 7 Penampang Baja

Daktilitas Tinggi penampang (*Highly Ductile Member*)

Rasio lebar terhadap ketebalan ≤ λ_{hdm}

Bagian sayap

$$\frac{b}{tf} = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda hd = 0{,}32\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad \text{.....(2.6)}$$

Bagian Badan

Untuk Ca ≤ 0,114

$$\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 2{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(1\text{-}1{,}04Ca) \quad \text{.....(2.7a)}$$

Untuk Ca > 0,114

$$\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 0{,}88\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(2{,}68\text{-}Ca) \geq 1{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}} \quad \text{.....(2.7b)}$$

Dimana :

Ca = $\frac{Pu}{\emptyset cPy}$ (LRFD)

Daktilitas Sedang (*Moderately Ductile Member*)

Rasio lebar terhadap ketebalan ≤ λ_{mdm}

Bagian sayap

$$\frac{b}{tf} = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda md = 0{,}40\sqrt{\frac{E}{RyFy}} \quad \text{.....(2.8)}$$

Bagian Badan

Untuk Ca ≤ 0,114

$$\frac{h}{tw} = \leq \lambda md = 3{,}96\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(1\text{-}3{,}04Ca) \quad \text{.....(2.8a)}$$

Untuk Ca > 0,114

$$\frac{h}{tw} = \leq \lambda md = 1{,}29\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(2{,}12\text{-}Ca) \geq 1{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}} \quad \text{.....(2.8b)}$$

Dimana :

Ca = $\frac{Pu}{\emptyset cPy}$ (LRFD)

3. Penampang diklasifikasikan menjadi penampang Langsing dan tidak langsing apabila semua elemen tekan mempunyai rasio

λ ≥ λr

Flens:

$\boldsymbol{\lambda} = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda p = 0{,}38\sqrt{\frac{E}{Fy}}$ .....(2.9a)

Web:

$\boldsymbol{\lambda} = \frac{h}{tw} \leq \lambda p = 3{,}76\sqrt{\frac{E}{Fy}}$ .....(2.9b)

1. Penampang Kompak

Mn = Mp = Z . fy .....(2.10a)

Yang menyatakan bahwa :

Mn = Momen plastis (N.mm)

Fy = Tegangan leleh baja (Mpa)

Zx = $b\,.\,t_f\left(d - t_f\right) + \frac{1}{4}.\,t_w.\,(d - t_f)^2$ untuk profil WF, mm^3 .....(2.10b)

Zy = $\frac{1}{2}.\,b^2\,.\,t_f + \frac{1}{2}.\,t_w{}^2.\left(d - t_f\right)$ untuk profil WF, mm^3.... .....(2.10c)

b = lebar pada sayap (mm)

d = tinggi pada penampang (mm)

tf = tebal pada sayap (mm)

tw = tebal pada badan (mm)

2. Penampang Tak Kompak

Mn = Mp – (Mp – M) $\frac{\lambda - \lambda p}{\lambda r - \lambda p}$ .....(2.10d)

Mr = (fy – fr) x S .....(2.10e)

Dengan :

Mr = momen batas tekuk (Nmm)

Fr = tegangan pada sisa (Mpa)

Fr = 70 Mpa ntuk penampang dilas panas

Fr = 115 Mpa untuk penampang yang dilas

3. Penampang Langsing

Mn = Mr $(\frac{\gamma}{b})^2$ .....(2.10f)

Tabel 2. 3 Perbandingan Rasio Lebar Terhadap Tebal Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Aksi Tekan dengan Aksi Tekan dengan Batasan Rasio Lebar terhadap Tebal untuk Elemen Tekan Untuk Komponen Struktur Dektail Sedang dan Dektail Tinggi

	Deskripsi dari Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batasan Rasio Terhadap Tebal	
			Λhdm	λmdm
Elemen Tak Diperkaku	Sayap profil I, Kanal, dan T gilas atau tersusun; kaki profil siku tunggal atau ganda dengan pemisah; kaki bebas sepasang profil siku terhubung menerus	b/t	$0{,}32\sqrt{E/Fy}$	$0{,}40\sqrt{E/Fy}$
	Sayap profil fondasi tiang H menurut Pasal D4	b/t	Tidak berlaku	$0{,}48\sqrt{E/Fy}$
	Badan profil T	d/t	$0{,}32\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$0{,}40\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Elemen Diperkaku	Dinding PSR persegi	b/t	$0{,}65\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$0{,}76\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
	Sayap dari profil I kotak tersusun	b/t		
	Pelat samping profil I kotak tersusun dan dinding profil kotak tersusun yang digunakan sebagai breis diagonal	h/t		
	Sayap profil kotak tersusun yang digunakan sebagai balok perangkai	b/t		
	Badan profil I gilas atau tersusun dan kanal yang digunakan sebagai breis diagonal	h/tw	$1{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$1{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Elemen diperkaku	1) Dinding PSR persegi	b/t	$0{,}65\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$1{,}18\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
	2) Sayap dan pelat samping profil I kotak, badan dan sayap profil kotak tersusun	h/t		

	Jika digunakan pada balok, kolom atau perangkai, sebagai pelat badan yang mengalami lentur atau kombinasi aksial-lentur: 1) Badan profil I gilas atau tersusun 2) Pelat samping profil I kotak 3) Badan profil kotak	 h/tw h/t h/t	Untuk Ca ≤ 0,114 $\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 2{,}57\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(1-1{,}04Ca)$ Untuk Ca ≥ 0,114 $\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd\ 0{,}88\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(2{,}68-Ca) \geq 1{,}57\sqrt{\frac{E}{Fy}}$ Dimana : Ca = $\frac{Pu}{\emptyset cPy}$ (LRFD)	Untuk Ca ≤ 0,114 $\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 3{,}96\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(1-3{,}04Ca)$ Untuk Ca ≥ 0,114 $\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd\ 1{,}29\sqrt{\frac{E}{RyFy}}(2{,}68-Ca) \geq 1{,}57\sqrt{\frac{E}{Fy}}$ Dimana : Ca = $\frac{Pu}{\emptyset cPy}$ (LRFD)
Elemen Diperkaku	Badan profil kotak tersusun	h/t	$0{,}67\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$1{,}75\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
	Badan profil fondasi tiang H	h/tw	Tidak berlaku	$1{,}75\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
	Dinding PSR bulat	d/t	$0{,}053\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$0{,}062\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Komposit	Dinding komponen struktur komposit terisi beton persegi	b/t	$1{,}48\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$2{,}37\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
	Dinding komponen struktur komposit terisi beton bundar	d/t	$0{,}085\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$	$0{,}17\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$

Sumber SNI 7860-2020

Tabel 2. 4 Rasio Lebar Terhadap Tebal Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Lentur

	Kasus	**Deskripsi Elemen**	**Rasio Lebar terhadap Tebal**	**Batas rasio lebar terhadap tebal λr (langsing/nonlangsing**	
				λp	λr
Elemen kaku	1	Sayap profil I dilas panas, kanal dan sayap T	b/t	$0{,}38\frac{E}{fy}$	$1{,}00\frac{E}{fy}$
	2	Sayap profil I tersusu bentuk I simetris ganda dan tunggal	b/t	$0{,}38\frac{E}{fy}$	$0{,}95\frac{E}{fy}$
	3	Kaki siku tunggal	b/t	$0{,}54\frac{E}{fy}$	$0{,}91\frac{E}{fy}$
	4	Sayap semua profil I dan kanal yang mengalami lentur terhadap sumbu lemah	b/t	$0{,}38\frac{E}{fy}$	$1{,}00\frac{E}{fy}$
Elemen tidak kaku	5	Badan T	d/t	$0{,}84\frac{E}{fy}$	$1{,}52\frac{E}{fy}$
	6	Beban profil simetris ganda dan kanal	h/tw	$3{,}76\frac{E}{fy}$	$5{,}70\frac{E}{fy}$
	7	Badan profil simetris tunggal	hc/tw	$\frac{\frac{hc}{hp}\sqrt{\frac{E}{fy}}}{(0{,}54\frac{Mp}{My}-0{,}09)} < \lambda r$	$5{,}70\frac{E}{fy}$
	8	Sayap PSR Persegi Panjang	b/t	$1{,}12\frac{E}{fy}$	$1{,}40\frac{E}{fy}$

Sumber: SNI 1729:2020 Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural

Tabel 2. 5 Rasio Lebar Terhadap Tebal Elemen Tekan Komponen Struktur yang Mengalami Lentur

	Kasus	**Deskripsi Elemen**	**Rasio Lebar terhadap Tebal**	**Batas rasio lebar terhadap tebal λr (langsing/nonlangsing**	**Batas rasio lebar terhadap tebal**	
					λhd	λmd
Elemen tidak kaku	1	Sayap profil I di gilas panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I gilas panas, kaki berdiri bebas dari sepasang siku sambung dengan kontak menerus, sayap kanal dan sayap T	b/t	$0{,}56\frac{E}{fy}$	$0{,}32\frac{E}{fy}$	$0{,}4\frac{E}{fy}$
	2	Sayap profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	b/t	$0{,}64\frac{E}{fy}$	Tidak berlaku	$0{,}48\frac{E}{fy}$
	3	Kaki siku tunggal, kaki siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tidak di perkaku lainnya	b/t	$0{,}45\frac{E}{fy}$	Tidak berlaku	Tidak berlaku
	4	Badan T	d/t	$0{,}75\frac{E}{fy}$	$0{,}32\frac{E}{Ry.fy}$	$0{,}4\frac{E}{Ry.fy}$

Sumber: SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi Bangunan Gedung Baja Struktural

2.9.1 Perencanaan Struktur balok komposit

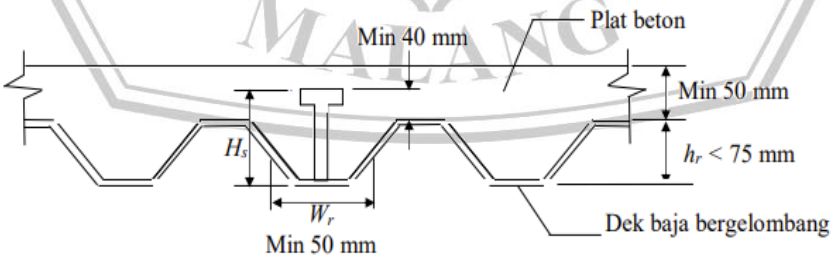
Struktur balok komposit antara beton dan balok baja merupakan struktur yang memanfaatkan kelebihan dari beton dan baja yang bekerja bersama-sama sebagai satu kesatuan. Kelebihan tersebut adalah beton kuat terhadap tekan dan baja kuat terhadap tarik. kinerja dari struktur balok tersebut apabila kedua material tersebut bekerja secara bersama-sama. Kelebihan dari struktur komposit beton-baja yaitu mampu meningkatkan kapasitas momen balok, mampu mencegah korosi jika struktur komposit baja terselimuti oleh beton, meningkatkan kapasitas beban pada balok, dan durabilitas struktur balok komposit yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan balok homogen atau balok dengan satu material saja. Balok komposit memiliki kaitan yang erat dengan shear stud atau penghubung geser. Penghubung

geser menjadi sangat penting karena merupakan komponen yang menjamin terjadinya sistem komposit antara beton dan baja (Cahyati, 2016).

1. Balok Komposit dengan Dek Baja Gelombang

Persyaratan dek baja gelombang dan penghubung gesernya untuk digunakan dalam komponen struktur komposit diatur dalam pasal I3.2a dan I3.2b SNI 1729:2020 dengan diisyaratkan:

a. Tinggi rusuk nominal tidak lebih besar dari 3 in. (75 mm). Lebar rata-rata rusuk atau hauns beton, wr , harus tidak kurang dari 2 in. (50 mm), tetapi tidak boleh diambil dalam perhitungan sebagai lebih dari lebar bersih minimum di dekat bagian paling atas dek baja.
b. *Slab* beton harus disambungkan ke balok baja dengan angkur baja stad berkepala yang dilas baik melalui dek tersebut atau langsung ke penampang melintang baja. Angkur baja stad berkepala, setelah instalasi, harus diperpanjang tidak kurang dari $1^1/_2$in. (38 mm) di atas bagian paling atas dek baja dan harus ada paling sedikit $^1/_2$ in. (13 mm) selimut beton terspesifikasi di atas bagian paling atas angkur baja stadberkepala.
c. Tebal *slab* di atas dek baja tidak boleh kurang dari 2 in. (50 mm).
d. Dek baja harus diangkur ke semua komponen struktur pendukung pada spasi tidak melebihi 18 in. (460 mm). Angkur yang demikian harus diberikan dengan angkur baja stad berkepala, kombinasi dari angkur baja stad berkepala dan las *arc spot* (*puddle*), atau perangkat lain yang terspesifikasi dalam dokumen kontrak.



Gambar 2. 8 Penampang Melintang Dek Baja Gelombang

Sumber: SNI 1729-2020

Dalam perencanaan pelat atap yang menggunakan *floor deck*, tulangan positif digantikan peranannya dengan *floor deck*. Besarnya nilai momen kapasitas *floor deck* dapat dihitung dengan rumus:

$Mn = As.\ Fy\ (deff - \frac{a}{2})$ .....(2.11a)

Dengan

$a = \frac{AS.fy}{0.85\ .\ fc\ .b}$ .....(2.11b)

Dalam perencanaan tulangan lapis atas terlebih dahulu perlu ditentukan rasio tulangan maksimum dan minimum. Berdasarkan SNI 2487:2019 pasal 9.6.1.2, nilai rasio tulangan minimum diambil yang terbesar antara dua persamanaan berikut ini.

$\rho b = 0{,}85\ x\ \beta 1\ x\ \frac{fc'}{fy}\ x\ (\frac{600}{600+fy})$ .....(2.12a)

$\rho maks = 075 \times \rho b$ .....(2.12b)

atau

$\rho min = \frac{1{,}4}{fy}$ .....(2.12c)

$Rn = \frac{Mu}{\emptyset\ .\ b\ .\ d^2}$ .....(2.12d)

$m = \frac{fy}{0{,}85\ .\ fc'}$ .....(2.12e)

$\rho = \frac{1}{m}\ (1 - \sqrt{1 - \frac{2m\ .\ Rn}{fy}}$ ..... (2.12f)

$As\ perlu = \rho\ x\ b\ x\ d$ .....(2.12g)

Dengan didapatkannya rasio tulangan maka dihitung luas tulangan yang dibutuhkan (As teoritis) kemudian akan didapatkan tulangan aktualnya.

Tabel 2. 6 Luas Penampang Tulangan Kawat Baja *Wire Mesh*

Diameter Kawar D (mm)	Luas Kawat D (cm^2)	Jumlah Luas Penampang Kawat (cm^2/m^1) Menurut Spasinya Setiap Arah								
		Spasi (mm)								
		50	75	100	125	150	175	200	225	250
4,0	0,126	2,51	1,68	1,26	1,01	0,84	0,72	0,63	0,56	0,50
4,5	0,156	3,18	2,12	1,59	1,27	1,06	0,91	0,80	0,71	0,64
5,0	0,196	3,93	2,62	1,96	1,57	1,31	1,12	0,98	0,87	0,79
5,5	0,238	4,75	3,17	2,38	1,90	1,58	1,36	1,19	1,06	0,95
6,0	0,283	5,65	3,77	2,83	2,26	1,88	1,62	1,41	1,26	1,13
6,5	0,332	6,64	4,42	3,32	2,65	2,21	1,90	1,66	1,47	1,33
7,0	0,385	7,70	5,13	3,85	3,08	2,57	2,20	1,92	1,71	1,54
7,5	0,442	8,84	5,89	4,42	3,53	2,95	2,52	2,21	1,96	1,77
8,0	0,503	10,05	6,70	5,03	4,02	3,35	2,87	2,51	2,23	2,01
8,5	0,567	11,35	7,57	5,67	4,54	3,78	3,24	2,84	2,52	2,27
9,0	0,636	12,72	8,48	6,36	5,09	4,24	3,64	3,18	2,83	2,54
9,5	0,709	14,18	9,45	7,09	5,67	4,73	4,05	3,54	3,15	2,84
10,0	0,785	15,71	10,47	7,85	6,28	5,24	4,49	3,93	3,49	3,14
12,0	1,131	22,62	15,08	11,31	9,05	7,54	6,46	5,65	5,03	4,52
16,0	2,011	40,21	26,81	20,11	16,08	13,40	11,49	10,05	8,94	8,04

Sumber : Katalog *Wire Mesh* PT. Union Metal

Jika gelombang pada dek baja dipasang tegak lurus terhadap balok penopangnya, maka kuat nominal penghubung geser jenis paku harus direduksi dengan suatu faktor, rs yang besarnya ditetapkan sebagai berikut:

Tabel 2. 7 Tinggi minimum balok non-prategang atau pelat satu arah atau plat solid arah non-prategang

Tinggi minimum, h				
Komponen Struktur	Tertumpu Sederhana	Satu Ujung Menerus	Kedua Ujung menerus	Kantilever
	Untuk balok non prategang yang tidak bertumpu atau melekat pada partisi atau konstruksi lain yang mungkin rusak akibat lendutan yang besar, ketebalan keseluruhan pelat h tidak boleh kurang dari batas minimum pada Tabel 9.3.1.1, kecuali jika hasil hitungan pada batas lendutan 9.3.2 terpenuh			
Pelat solid	l/20	l/24	l/28	l/10
Balok atau pelat rusuk satu- arah	l/16	l/18,5	l/21	l/8

Lendutan yang dihitung berdasarkan tabel di atas tidak boleh melebihi batasan berikut

Tabel 2. 8 Lendutan izin maksimum yang dihitung

Jenis komponen	Kondisi		Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar		Lendutan seketika akibat Lr dan R maksimum	L/180
			Lendutan seketika akibat L	L/360
Atap atau Lantai	Memikul atau disatukan dengan elemenelemen nonstruktural	Mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup	L/480
		Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar		L/240

Sumber : SNI 2847-2019

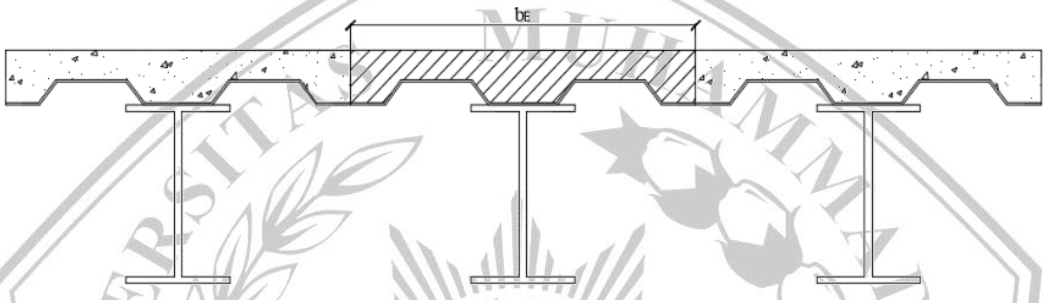
Lebar Efektif Balok Baja Komposit

Konsep lebar efektif sangat berguna dalam proses desain suatu komponen struktur (komposit) terutama ketika proses desain harus dilakukan terhadap suatu elemen yang mengalami distribusi tegangan yang tidak seragam. Besarnya lebar efektif dari suatu komponen struktur komposit dapat ditentukan sebagai berikut:

$b_E \leq \frac{1}{8}$ bentang balok, jarak as ke as tumpuan

$b_E \leq \frac{1}{2}$ jarak ke sumbu dari balok yang berdekatan

$b_E \leq$ jarak ke tepi *slab* (pelat)



Gambar 2. 9 Lebar Efektif Balok Komposit

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Tegangan pada Balok Komposit

Dalam menentukan tegangan yang terjadi pada suatu komponen komposit, terlebih dahulu harus diketahui titik berat komponen tersebut. Karena terdapat perbedaan pada baja dan beton, maka beton harus ditransformasikan ke penampang baja yang di jelaskan pada sub bab sebelumnya cara mentransformasikannya adalah sebagai berikut :

Luas transformasi = $\frac{bE}{n}$ .....(2.13)

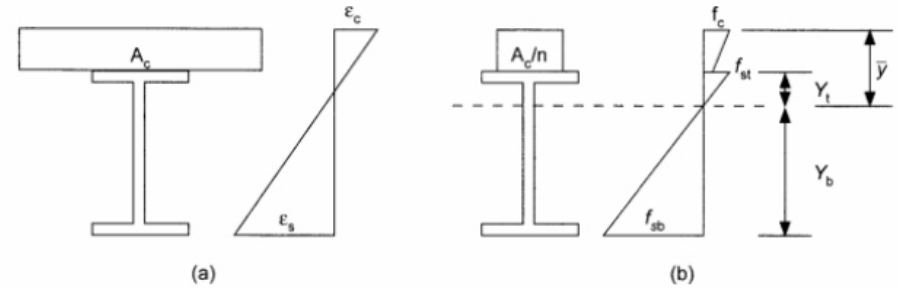
Dimana:

n : rasio modular = $\frac{\mathrm{ES}}{\mathrm{EC}}$ .....(2.13a)

Es : modulus elastis baja (200000 MPa)

EC : modulus elastis beton = $4700\sqrt{\mathrm{f'C}}$ (MPa)

f'C : kuat tekan rencana pada usia 28 hari (MPa)



Gambar 2. 10 Diagram Regangan Tegangan Balok

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Setelah ditemukan luas transformasi, perlu dihitung momen inersia penampang, sehingga besarnya tegangan dapat diketahui, besarnya tegangan suatu penampang dapat ditentukan dengan:

F_{st} : $\frac{M\ x\ y_t}{\mathrm{I}}$ .....(2.13b)

F_{sb} : $\frac{M\ x\ y_b}{\mathrm{I}}$ .....(2.13c)

F_C : $\frac{M\ x\bar{y}}{\mathrm{n\ x\ I}}$ .....(2.13d)

Dimana:

M : momen yang terjadi

I : momen inersia penampang

Yb : jarak titik berat penampang dengan tepi bawah penampang baja

yt : jarak titik berat penampang dengan tepi atas penampang baja

$\bar{y}$: jarak titik berat penampang dengan tepi atas penampang beton

2.9.1.1 Kekuatan Lentur Nominal

Kekuatan Lentur *Positif*

Menurut SNI 1729 – 2020 ditentukan sebagai berikut: Kekuatan lentur nominal desain, Øb. Mn dari suatu komponen struktur komposit (untuk momen *positif*) dan kekuatan lentur *positif* yang diizinkan, Mn harus ditentukan untuk keadaan batas leleh sebagai berikut:

a. Apabila h/tw ≤ 3,76 $\sqrt{E/Fy}$ .....(2.14a)

Mn harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis). Øb = 0.90

b. Apabila h/tw > 3,76 $\sqrt{E/Fy}$ .....(2.14b)

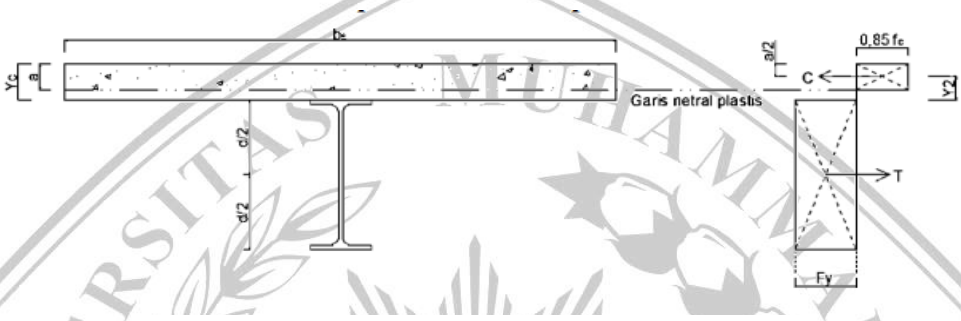
Untuk menghitung momen plastis balok komposit dicari posisi sumbu netral plastis, yang tergantung proporsi C dan T. Dengan nilai resultan gaya tekan dan tarik sebagai berikut:

C = 0,85 . f'c . Ac .....(2.15)

T = Fy . As .....(2.16)

Ada tiga kondisi distribusi tegangan plastis mungkin terjadi, yaitu sebagai berikut

a. Jika T ≤ C sumbu netral plastis didalam pelat beton



Gambar 2. 11 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi a
Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Volume pelat betonnya relatif besar, sehingga ketika terjadi momen lentur positif profil baja mengalami leleh terlebih dahulu. Tinggi blok tegangan tekan pada pelat beton (a) dapat dihitung sebagai berikut.

$$a = \frac{As.fy}{0{,}85\ .f'c\ .\ be} \quad \text{.....(2.17a)}$$

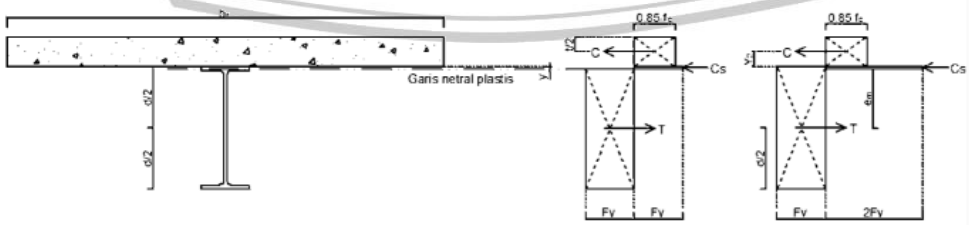
Asumsi benar jika a < tc jika pakai dek baja, atau a < t pelat beton solid

Yc = hr + tc .....(2.17b)

Y2 = Yc – 1/2 a .....(2.17c)

Mn = Mp = Fy . AS . (Y2 + 1/2 d) .....(2.17d)

b. Jika T > C sumbu netral plastis di baja (pelat sayap)



Gambar 2. 12 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi b didalam pelat baja sayap

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Kondisi ini terjadi jika luasan pelat beton relatif lebih kecil dibanding kopel tarik profil baja. Oleh sebab itu ketika terjadi momen positif maka profil baja juga masih mengalami desak. Itu terjadi jika tf > y > 0 yang dihitung dengan rumusan berikut.

$T = Fy \,.\, AS$ .....(2.18a)

$C = 0{,}85 \,.\, fc' \,.\, b_E \,.\, tc$ .....(2.18b)

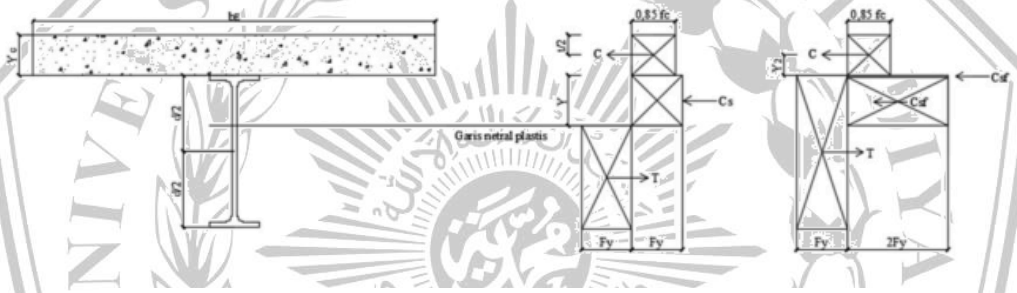
$Y = \frac{T-C}{bf \,.\, fy} \leq tf$ .....(2.18c)

$Cs = \frac{As \,.\, Fy-c}{2}$ .....(2.18d)

$Csm = 2\, Fy \,.\, y$ .....(2.18e)

$Mn = Mp = Cs\,(Y2 + 1/2\, d) + Csm\,(d - y)\, 1/2$ .....(2.18f)

c. Jika T > C sumbu netral plastis di baja (pelat badan)



Gambar 2. 13 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi c

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Jika y > tf maka kondisi ini yang mungkin terjadi. Luas pelat beton relatif lebih kecil dibanding luas profil baja. Untuk keseimbangan gaya, akibatnya bagian pelat badan dari profil baja juga masih mengalami tekan. Kondisi ini dapat terjadi jika T-C-Csf > 0. Adapun nilai-nilainya dihitung sebagai berikut:

$T = Fy \,.\, AS$ .....(2.19a)

$C = 0{,}85 \,.\, fc' \,.\, bE \,.\, tc$ .....(2.19b)

$Csf = bf \,.\, tf \,.\, 2Fy$ .....(2.19c)

$Y = \frac{T-C-Csf}{tw \,.\, fy} \leq tf$ .....(2.19d)

$Csw = 2\, Fy \,.\, y \,.\, tw$ .....(2.19e)

$yf = 1/2 \,.\, (d - tf)$ .....(2.19f)

$yw = 1/2 \,.\, (d + y) - tf$ .....(2.19g)

$Mn = Mp = C\,(Y2 + 1/2\, d) + Csf \,.\, yf + Csw \,.\, yw$ .....(2.19h)

a. Kuat Lentur *Negatif*

Menurut pasal I3.2a SNI 1729:2020 Kekuatan lentur *negatif* tersedia harus di tentukan untuk penampang baja sendiri menurut persyaratan Bab F. Alternatif, kekuatan lentur yang tersedia harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit, untuk keadaan batas leleh (momen plastis),

dimana Øb = 0,90 (DFBT) Ωb=1,67 (DKI) dengan memenuhi batasan sebagai berikut:

a. Balok baja adalah penampang kompak dan di breising secara cukup menurut Bab F.

b. *Steel headed stud* atau angkur kanal baja yang menyambungkan pelat balok baja pada daerah momen negatif.

c. Tulangan pelat yang parallel pada balok baja, di lebar efektif pelat, diperhitungkan dengan tepat.

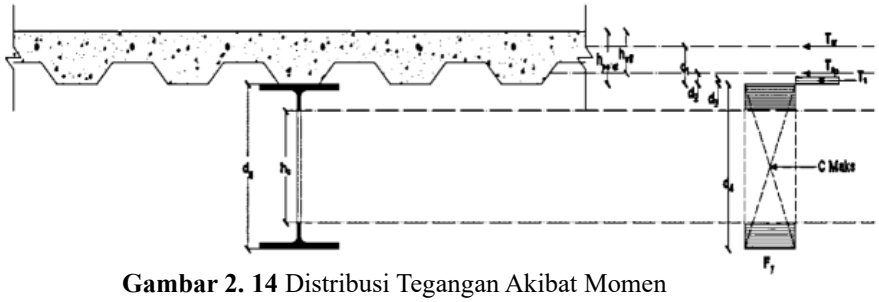
Tulangan yang diletakkan sejajar dengan sumbu longitudinal balok baja dan terletak pada pelat beton yang memiliki lebar efektif (bE) dapat digunakan sebagai bagian dari penampang komposit efektif. Hal ini dapat digunakan pada daerah momen *positif* maupun *negatif*. Namun pada daerah momen *positif*, tulangan hanya memberikan kontribusi yang sedikit. Hal yang sebaliknya terjadi pada pelat beton, di daerah momen negatif pelat beton berada dalam keadaan tarik, padahal beton tidak memiliki kemampuan yang cukup dalam menahan gaya tarik, sehingga pada daerah momen negatif pelat beton dapat diabaikan.

Jika tulangan yang dipasang pada pelat beton hendak diperhitungkan kontribusinya pada penampang komposit, maka gaya yang timbul pada tulangan harus ditransfer oleh penghubung geser. Kuat nominal yang timbul pada tulangan dapat dihitung sebesar:

$Tsr = Asr \times Fysr$ .....(2.20a)

Gaya tekan maksimum dari profil baja adalah:

$Cmaks = As \times Fy$ .....(2.20b)



Gambar 2. 14 Distribusi Tegangan Akibat Momen

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Karena Cmaks > Tsr, maka sumbu netral plastis akan jatuh pada profil baja dan kesetimbangan gaya dapat dihitung sebagai berikut:

Tsr + Ts = Cmaks – Ts .....(2.20c)

2Ts = Cmaks – Tsr .....(2.20d)

$Ts = \frac{Cmaks - Tsr}{2}$ .....(2.20e)

Gaya pada sayap, *Tf = bf . tf . Fy*

Gaya pada badan, *Tw = Ts – Tf*

Jarak sumbu netral dari tepi bawah *flens* adalah:

$aw = \frac{Tw}{Fy\ .\ tw}$ .....(2.20f)

Menentukan jarak gaya yang bekerja dari *centroid*:

$d1 = Yc\ \frac{tc}{2}$

$d2 = \frac{hr}{2}$

$d3 = \frac{aw}{2}$

$d4 = \frac{dg}{2}$

$Mn = T_{sr} \times (d_1 + d_4) + T_{sp} \times (d_2 \times d4) + T_s\ (d_4 - d_3)$.....(2.20g)

b. Kekuatan geser Nominal

Pada SNI 1729:2020 pasal G2, untuk memperhitungkan kuat geser nominal dapat ditentukan dengan persamaan dibawah ini.

Apabila $h/tw > 2{,}24\ \sqrt{E/Fy}$ .....(2.20h)

$Vn = 0{,}6\ Fy \times Aw \times Cvl$ .....(2.20i)

Keterangan:

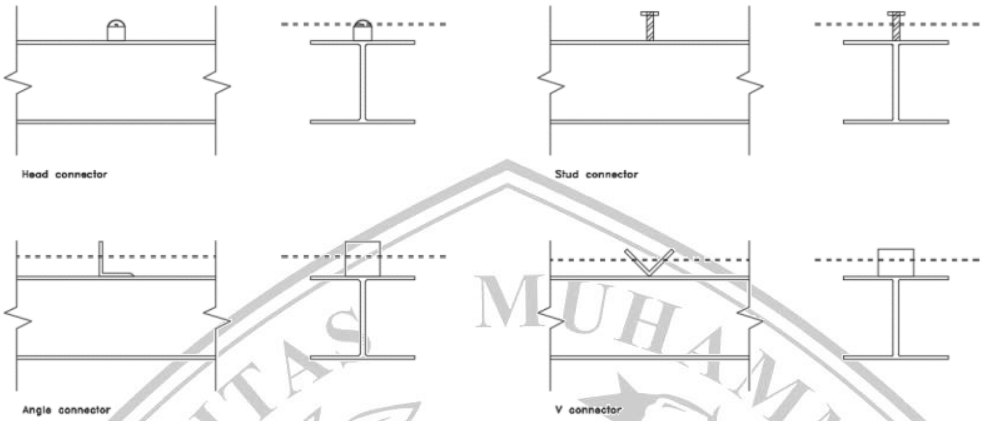
V_n = Kuat geser nominal (N)

$Ø_V$ = faktor tahanan untuk geser (0,90)

A_w = Luas badan (mm^2)

C_{v1} = 1,0

2.9.1.2 Penghubung Geser Angkur Baja Stad Berkepala



Gambar 2. 15 Macam-macam penghubung geser

Sumber: SNI 1729-2020

Pemakaian balok komposit akan menimbulkan gaya geser pada plat beton dan balok baja. Agar penampang komposit bekerja secara kongkrit, untuk megatasi gaya geser horizontal yang terjadi tersebut maka pada balok komposit perlu dipasang penghubung geser. Penghubung geser yang umumnya dipakai adalah jenis stud dan kanal.

Kekuatan geser nominal satu angkur *steel headed* stud yang ditanamkan pada suatu plat beton *solid* atau pada suatu plat komposit dengan dek harus ditentukan sebagai berikut :

Qn = 0,5 $A_{sa}.\sqrt{Fc'\ Ec} \leq R_g.R_p.A_{sa}.F_u$ .....(2.21a)

Keterangan :

Asa : luas penampang dari angkur *steel headed stud* (mm^2)

EC : modulus elastisitas beton $Wc^{1,5}\sqrt{Fc'}$ Ksi (0,043$Wc^{1,5}\sqrt{Fc'}$)

Fu : kekuatan Tarik minimum yang diisyaratkan dari suatu angkur *steel headed stud* (MPa)

Tabel 2. 9 Nilai Rg dan Rp

Kondisi	R_g	R_p
Tanpa Dek	1,00	0,75
Dek diorientasi paralel terhadap profil baja		
$\frac{Wr}{Hr} \geq 1,5$	1,00	0,75
$\frac{Wr}{Hr} < 1,5$	0,85[a]	0,75
Dek diorientasi tegak lurus terhadap profil baja Jumlah dari angkur *steel headed stud* yang memiliki rusuk dek sama	1,00	0,60[b]
1	0,85	0,60[b]
2	0,70	0,60[b]
3 atau lebih		

Sumber : SNI 1729-2020

Keterangan :

h_r = tinggi rusuk nominal, in (mm)

W_r = Lebar rata – rata rusuk (mm)

[a] = untuk angkur *steel headed stud* tunggal

[b] = nilai ini dapat ditingkatkan sampai -,75 bila $e_{mid\text{-}ht} \geq 2$ in (51 mm)

Kekuatan geser nominal satu angkur kanal gilas panas yang ditanam pada slab beton solid harus ditentukan sebagai berikut:

Qn= 0,3 $(t_f + 0,5t_w)$. $l_a.\sqrt{Fc'\ Ec}$ .....(2.21b)

Dengan:

la = panjang angkur kanal, in. (mm)

tf = tebal sayap angkur kanal, in. (mm)

tw = tebal badan angkur kanal, in. (mm)

Kekuatan dari angkur kanal harus dikembangkan dengan pengelasan kanal ke sayap balok untuk suatu gaya yang sama dengan Qn, dengan memperhitungkan eksentrisitas pada konektor. Jumlah angkur baja yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut:

V’ = Fy × As .....(2.22a)

N = $V\ Qn$ .....(2.22b)

keterangan:

N = jumlah angkur konektor yang dibutuhkan

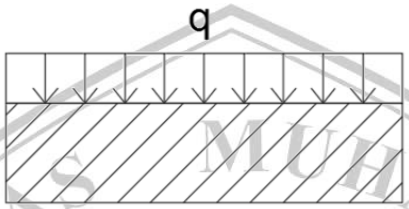
V’ = gaya geser horizontal

Qn = kuat geser nominal satu buah angkur konektor

2.9.1.3 Lendutan

Lendutan ditinjau akibat pengaruh beban mati dan beban hidup

1. Akibat beban merata



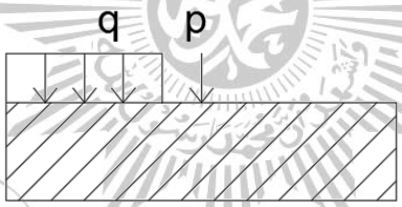
Gambar 2. 16 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

Lendutan akibat pengaruh beban merata

$\Delta max = \frac{(DL)-l^4}{384.EI}$ .....(2.23a)

$\Delta x = \frac{(DL)-l^2}{24.EI}(l-x)^2$ .....(2.23b)

2. Akibat beban merata dan beban terpusat ditengah



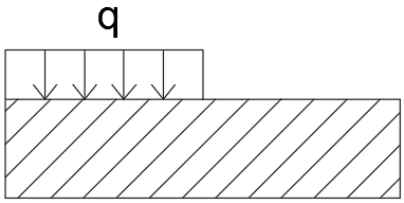
Gambar 2. 17 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata dan Terpusat

Lendutan akibat pengaruh beban merata dan beban terpusat

$\Delta max = \frac{Pl^3}{192.EI}$ .....(2.23c)

$\Delta x(x<\frac{L}{2}) = \frac{Px^3}{48.EI}(3l.4x))$ .....(2.23d)

3. Akibat beban merata diujung balok kantilever

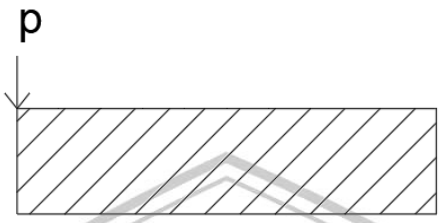


Gambar 2. 18 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

Δ max = $\frac{Wl^4}{8.EI}$ .....(2.23e)

Δx = $\frac{w}{24.EI}(x^4 - 4l^3x + 3L^3)$ .....(2.23f)

4. Akibat beban terpusat diujung balok kantilever



Gambar 2. 19 Beban Terpusat di Ujung Balok Kantilever

Δmax = $\frac{Pl^3}{3EL}$ .....(2.23g)

Δx = $\frac{p}{6EI}(2l^3 - 3l^2x - Tx^3)$ .....(2.23h)

2.9.2 Perencanaan Batang Tarik

Material baja mempunyai kemampuan sama dalam memikul gaya tarik atau gaya tekan. Mutu bahannya juga relatif tinggi, sehingga dimensi struktur cenderung langsing. Untuk struktur seperti itu, pemakaian material baja hanya efisien untuk batang tarik. Batang tarik banyak dijumpai dalam banyak struktur baja, seperti struktur – struktur jembatan, rangka atap, menara transmisi, ikatan angin dan lain sebagainya. Batang ini dapat terdiri dari profil tunggal ataupun profil – profil tersusun.

1. Batas Kelangsingan

Karena mutu material baja relatif tinggi, dimensi batang tariknya bisa sangat langsing. Secara teoritis, kondisi kelangsingan hanya diperhitungkan untuk elemen tekan, untuk mengantisipasi tekuk. Batang tarik secara teoritis tidak mengalami tekuk, oleh karena itu batang tarik tidak dibatasi kelangsingannya, hanya disarankan L/r ≤ 300 sesuai SNI 1729-2020. Saran didasarkan pengalaman praktis segi ekonomis, kemudahan pembuatan, dan resiko rusak yang kecil selama konstruksi. Selain itu, elemen yang sangat langsing biasanya cenderung bergoyang atau bergetar, dan itu membuat tidak nyaman bagi penghuninya.

2. Kekuatan Tarik

Kuat tarik rencana Øt Pn, dengan Øt sebagai faktor ketahanan tarik dan Pn sebagai kuat aksi nominal, adalah nilai terkecil dari dua tinjauan batas keruntuhan yang terjadi pada penampang utuh dan penampang berlubang (tempat sambungan). Kuat tarik penampang utuh terhadap keruntuhan leleh (*yield*):

a. Untuk leleh Tarik pada penampang bruto:

$P_n = F_y A_g$ .....(2.24a)

Øt = 0,9 terhadap keruntuhan leleh

b. Untuk keruntuhan Tarik pada penampang neto:

$P_n = F_u A_e$ .....(2.24b)

Øt = 0,75 terhadap keruntuhan fraktur

dimana:

Ag = luas penampang bruto, mm2

Ae = luas neto efektif, mm2

Kuat tarik penampang berlubang (ditempat sambungan) akan memanfaatkan perilaku *strain-hardening* (peningkatan tegangan) pada kondisi regangan inelastis yang dipicu oleh lonjakan tegangan terkonsentrasi di sekitar lubang.

$P_n = F_u A_e = F_u . A_n . U$ .....(2.24c)

dimana:

Øt = 0,75 terhadap keruntuhan fraktur

An = luas penampang bersih (*netto*)

Ae = luas penampang efektif

U = faktor *shear lag*

Nilai F_y dan F_u tergantung dari mutu material, yaitu kuat leleh dan kuat tarik minimum (kuat batas) dari bahannya. Keruntuhan leleh (*yield*) tingkat daktilitasnya lebih tinggi dari keruntuhan fraktur, oleh sebab itu maka faktor ketahanan tarik (Øt) antara keduanya berbeda. Faktor keamanan untuk fraktur tentunya lebih tinggi.

2.9.3 Perencanaan Batang Tekan

Batang tekan ditujukan untuk komponen struktur yang memikul beban tekan sentris tepat pada titik berat penampang, atau kolom dengan gaya aksial saja.

Namun pada umumnya, terdapat eksentrisitas oleh ketidaklurusan batang, atau oleh ketidaktepatan pembebanan, juga kekangan dari tumpuannya yang menimbulkan momen.

3. Parameter Batang Tekan

Parameter material, F_y dan F_u akan menentukan kuat batang tarik, tetapi pada batang tekan hanya F_y yang penting, F_u tidak pernah tercapai. Selain material, maka batang tekan juga dipengaruhi oleh parameter lain, yaitu konfigurasi bentuk fisik atau geometri.

Parameter geometri terdiri dari luas penampang (*A*), pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}), panjang batang dan kondisi pertambatan atau tumpuan, yang diwakili oleh panjang efektif (*KL*). Ketiganya dapat diringkas lagi menjadi satu parameter tunggal, yaitu rasio kelangsingan batang (KL/r_{min}), dimana $r_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$ adalah radius girasi pada arah tekuk. Secara visual, tekuk dapat dibedakan menjadi dua, yaitu

a. tekuk lokal pada elemen penampang, dan
b. tekuk global pada batang secara menyeluruh.

4. Kuat Tekan Nominal

Tekuk global ditentukan oleh kelangsingan elemen penampang dan bentuknya. Ada tiga perilaku tekuk, yaitu (1) tekuk lentur; (2) tekuk torsi dan (3) tekuk lentur-torsi. Adapun tekuk global atau lokal tergantung klasifikasi penampang, jika penampangnya tidak-langsing maka tidak terjadi tekuk lokal, dan sebaliknya penampang langsing berisiko tekuk lokal terlebih dahulu. Karena tekuk terjadi pada kondisi elastis, sebelum leleh maka agar efisien perlu dipilih penampang tidak langsing.

a. Tekuk Lentur

Tekuk lentur yang dimaksud adalah fenomena tekuk global pada penampang dengan klasifikasi elemen tidak langsing. Beban kritis yang menyebabkan tekuk tersebut telah dirumuskan oleh Euler. Sampai saat ini rumus tersebut tetap dijadikan dasar menentukan kuat nominal batang tekan (Pn). Agar berkesesuaian dengan cara perencanaan batang tarik, maka luas penampang utuh

atau *gross* (Ag) dijadikan konstanta tetap, adapun variabelnya adalah tegangan kritis (Fcr), yang dituliskan dalam format berikut.

$P_n = F_{cr} A_g$ .....(2.25a)

Tegangan kritis, Fcr dihitung berdasarkan syarat berikut, jika:

$\frac{Lc}{r} \leq 4{,}71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{Fy}{Fe} \leq 2{,}25$ tekuk *inelastis*, maka:

Fcr = $(0{,}658^{\frac{Fy}{Fe}})$.Fy .....(2.25b)

$\frac{Lc}{r} \leq 4{,}71\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{Fy}{Fe} > 2{,}25$ tekuk elastis, maka:

Fcr = 0,877.Fe .....(2.25c)

dengan

Pn = Kuat tekan nominal pada kondisi tekuk lentur (N)

Øc = Faktor reduksi kuat tekan (0,90)

Ag = luas penampang melintang bruto komponen struktur, in.2 (mm^2)

E = modulus elastisitas baja = 29.000 ksi (200.000 MPa)

Fe = tegangan tekuk elastis (MPa)

dimana Fe = tegangan tekuk Euler (elastis), yaitu:

Fe = $\frac{\pi^2 E}{(\frac{Lc}{r})^2}$ .....(2.25d)

Dimana,

Fy = tegangan leleh minimum terspesifikasi untuk tipe baja yang digunakan, ksi (MPa)

r = radius girasi, in. (mm)

b. Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi

Fenomena tekuk, selain lentur ada lagi yaitu puntir (tekuk torsi), atau gabungan keduanya yaitu tekuk lentur-torsi. Biasa terjadi pada penampang dengan kekakuan torsi yang relatif kecil, atau pusat geser dan pusat beratnya tidak berhimpit. Kapasitas tekan nominal penampang kolom tidak-langsing terhadap tekuk torsi dan lentur-torsi adalah sebagai berikut.

$P_n = F_{cr} A_g$ .....(2.26a)

Tegangan Kritis, Fcr dihitung berdasarkan syarat berikut, jika:

Penampang siku ganda atau *tee*

$Fe\left(\frac{F_{ey+}\,F_{ez}}{2H}\right).[1-\sqrt{1-\frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey}F_{ez})^2}}\,]$ .....(2.26b)

Untuk penampang yang lain, Fcr tetap dengan rumus tekuk lentur, tetapi tegangan tekuk elastis Fe dihitung dengan memasukkan pengaruh kekakuan torsi batangnya sebagai berikut:

a. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

$Fe\left(\frac{F_{ey+}\,F_{ez}}{2H}\right).[1-\sqrt{1-\frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey}F_{ez})^2}}\,]$ .....(2.26c)

b. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

$Fe\left(\frac{\pi^2 ECW}{(K_2L)^2}+GJ\right)+\frac{1}{Ix+Iy}$ .....(2.26d)

Dimana,

G = Modulus elastisitas geser baja = 11.200 ksi (77.200 MPa)

H = konstanta lentur

J = konstanta torsi, in.4 (mm^4)

Ix,Iy = momen inersia terhadap sumbu utama x dan y, in.4 (mm^4)

2.9.4 Panjang efektif kolom

Panjang efektif kolom atau KL adalah cara sederhana tetapi efektif dalam memprediksi kekuatan kolom, yaitu dengan mencari korelasi bentuk tekuk yang berkesesuaian dengan rumus Euler ($P_{cr}=\frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$).

Panjang efektif (L_c) adalah nilai kekakuan sebuah batang tekan dalam perencanaan struktur. Panjang efektif digunakan untuk menghitung kelangsingan sebuah struktur. Dalam merencanakan panjang efektif dapat diperoleh berdasarkanpedoman SNI 1729:2020 pasal E2 yaitu :

Lc = K x L ..... (2.27)

Keterangan :

Lc = Panjang efektif batang tekan (mm)

L = Panjang batang tekan (mm)

K = Faktor panjang efektif (lihat Gambar 2.5)

Nilai kelangsingan ($\frac{Lc}{r}$) dibatasi yaitu tidak lebih dari 200. Hal ini sesuai dengan pedoman pada SNI 1729-2020 pasal E2. Adapun persamaan dapat dituliskan sebagai berikut :

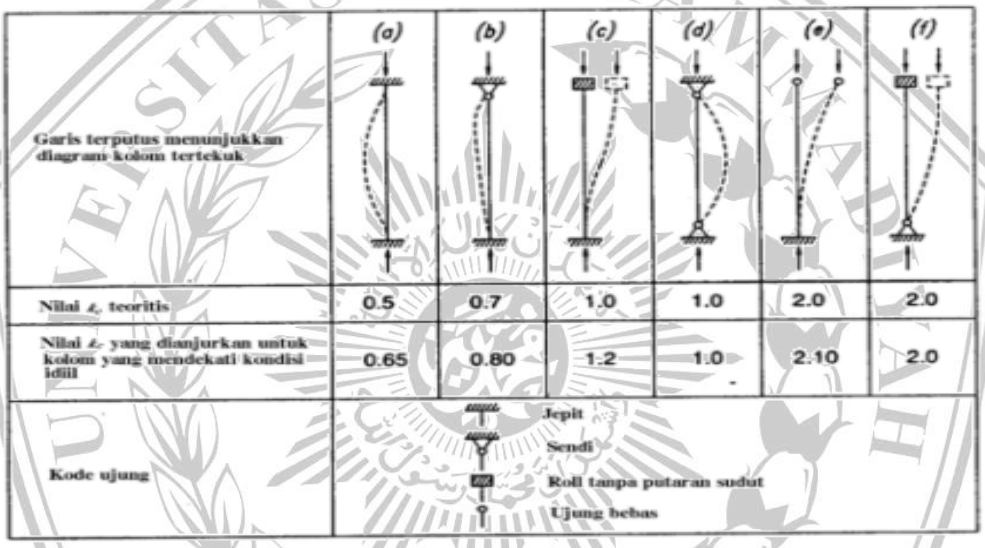
$\frac{Lc}{r} \leq 200$ .....(2.27a)

r = $\sqrt{\frac{I}{A}}$ ..... (2.27b)

Kondisi ideal tumpuan tidak mudah dievaluasi di lapangan, untuk itu rekomendasinya nilai K diperbesar. Meskipun akurat, tetapi implementasi tidak mudah, diperlukan proses penyederhanaan dari struktur real yang kompleks terlebih dahulu. Dalam hal ini cukup diklasifikasikan menjadi dua kategori dengan nilai K yang berbeda, yaitu:

a. Rangka tidak bergoyang: $0{,}5 \leq K \leq 1{,}0$

b. Rangka bergoyang: $1{,}0 \leq K \leq \infty$



Gambar 2. 20 Nilai K untuk kolom dengan ujung-ujung yang ideal

Sumber: SNI 1729-2020

2.9.5 Perencanaan (Balok-Kolom)

Batang baja terhadap gaya aksial saja (tarik atau tekan) hanya cocok untuk perencanaan struktur rangka batang (*truss*) dibebani pada titik buhul, dan berat sendirinya relatif kecil dibanding beban yang dipikul. Sedangkan batang baja dengan momen lentur hanya cocok untuk struktur balok, yang besar momen lenturnya lebih dominan dibanding gaya geser yang terjadi. Struktur yang elemen batangnya menerima kombinasi gaya aksial dan momen sekaligus harus direncanakan dengan perhitungan batang portal (balok-kolom). Pada dasarnya perencanaan batang portal ditinjau terhadap kuat tekan dan juga kuat lenturnya. Dari tinjauan kuat tekan akibat gaya aksial dan kuat lentur akibat gaya lentur

nantinya dihubungkan dengan persamaan interaksi antara kuat tekan dan kuat lentur sebagai berikut:

$Apabila;$

$\frac{Pr}{Pc} \geq 0{,}2$

maka :

$\frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9}(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy}) \leq 1{,}0$ .....(2.28a)

$Apabila; \frac{Pr}{Pc} < 0{,}2$

Maka;

$\frac{Pr}{2Pc} + (\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy}) \leq 1{,}0$ .....(2.28b)

Berdasarkan SNI 1729-2020

Pr = kekuatan aksial perlu, ditentukan sesuai dengan Bab C, dengan menggunakan kombinasi beban DFBT atau DKI, kips (N)

Pc = kekuatan aksial tersedia, ditentukan sesuai dengan Bab E, kips (N)

Mr = kekuatan lentur perlu, ditentukan sesuai dengan Bab C, menggunakan kombinasi beban DFBT atau DKI, kip-in. (N-mm)

Mc= kekuatan lentur tersedia, ditentukan sesuai dengan Bab F, kip-in. (N-mm)

x = indeks sehubungan dengan lentur sumbu mayor

y = indeks sehubungan dengan lentur sumbu minor

2.9.6 Sistem Rangka Terbreis Kosentris

Untuk *brace*, seperempat bagian tengah dari panjang *brace* dan zona yang berdekatan dengan setiap sambungan sama dengan tinggi komponen *brace* (d) pada bidang tekuk.

Rasio kelangsingan diagonal breis $Lc / r \leq 200$

Kekuatan perlu kolom, balok, strat dan sambungan dalam RBK harus ditentukan menggunakan efek beban seismik yang dibatasi kapasitas. Efek beban seismik horizontal yang dibatasi kapasitas. Breis-breis harus ditentukan dalam

kondisi tekan atau tarik dengan mengabaikan efek beban-beban gravitasi. Analisis harus memperhitungkan kedua arah pembebanan rangka.

a. Kekuatan tarik breis terekspektasi

RyFyAg , ...(2.29a)

dengan

Ag = luas penampang bruto, in. (mm2)

Kekuatan breis terekspektasi dalam kondisi tekan boleh diambil sebagai nilai terkecil antara

RyFyAg dan (1⁄0,877)FcreAg.....(2.29b)

5. Sambungan Balok ke Kolom

Bila *breis* atau pelat buhul menyambung ke semua komponen struktur pada sambungan balok ke kolom, sambungan harus sesuai dengan salah satu dari yang berikut:

Momen yang berhubungan dengan kekuatan lentur balok terekspektasi, RyMp , dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan αs

Momen yang berhubungan dengan jumlah dari kekuatan lentur kolom terekspektasi,

∑(RyFyZ) .....(2.29c)

6. Sambungan Breis

Kekuatan perlu sambungan breis dalam kondisi tarik, tekan dan lentur (termasuk sambungan balok ke kolom jika merupakan bagian dari sistem rangka terbreis) harus ditentukan seperti yang disyaratkan berikut ini. Kekuatan perlu ini boleh diperhitungkan secara independen tanpa interaksi.

a. Kekuatan Tarik perlu

Kekuatan leleh terekspektasi breis dalam kondisi tarik, ditentukan sebagai

RyFyAg .....(2.29d)

b. Kekuatan Tekan Perlu

Sambungan breis harus didesain untuk kekuatan tekan perlu, berdasarkan kondisi batas tekuk, sebesar kekuatan breis terekspektasi dalam kondisi tekan dibagi dengan αs.

Sambungan-sambungan breis harus didesain untuk menahan gaya atau rotasi lentur yang muncul akibat tekuk breis. Sambungan-sambungan yang memenuhi salah satu ketentuan berikut dianggap memenuhi persyaratan tersebut:

(a) Kekuatan Lentur Perlu

Sambungan-sambungan breis yang dirancang untuk menahan gaya lentur yang muncul akibat tekuk breis harus memiliki kekuatan perlu sebesar kekuatan lentur breis terekspektasi dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan αs. Kekuatan lentur breis terekspektasi harus ditentukan sebagai

RyMp (breis terhadap sumbu tekuk kritis.) .....(2.29e)

(b) Kapasitas Rotasi: Sambungan-sambungan breis yang didesain untuk menahan rotasi yang muncul akibat tekuk breis harus memiliki kapasitas rotasi yang cukup untuk mengakomodasi rotasi yang diperlukan pada drift antar tingkat desain pada tingkat tersebut. Rotasi inelastis sambungan diperbolehkan

3. Sambungan Breis Balok-kolom

Breis atau pelat buhul menyambung ke semua komponen struktur pada sambungan balok ke kolom, sambungan harus sesuai dengan salah satu dari yang berikut:

(a) Rakitan sambungan harus sambungan sederhana yang memenuhi dengan rotasi yang diperlukan ditetapkan sebesar 0,025 rad atau,

(b) RyMp , dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan αs ,

dengan

Mp = momen lentur plastis, kip-in. (N-mm)

Momen yang berhubungan dengan jumlah dari kekuatan lentur kolom terekspektasi,

$\sum(RyFyZ) \cdot 1{,}1 / \alpha s$ .....(2.29f)

dengan

Fy = tegangan leleh minimum terspesifikasi, ksi (MPa)

Z = modulus penampang plastis terhadap sumbu lentur, in.3 (mm3)

αs = faktor penyesuaian level beban DFBT-DKI = 1,0 untuk DFBT dan 1,5 untuk DKI.

4. Pelat buhul

Untuk tekuk *breis* keluar bidang, las-las yang menyambungkan pelat buhul ke sayap balok atau sayap kolom secara langsung harus memiliki kekuatan geser tersedia sebesar

0,6RyFy tp/αs dikalikan dengan panjang *joint*. .....(2.29g)

dengan

Fy = tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, ksi. (MPa)

Ry = rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi pelat buhul, Ry

tp = ketebalan pelat buhul, in. (mm)

2.9.10 Sambungan

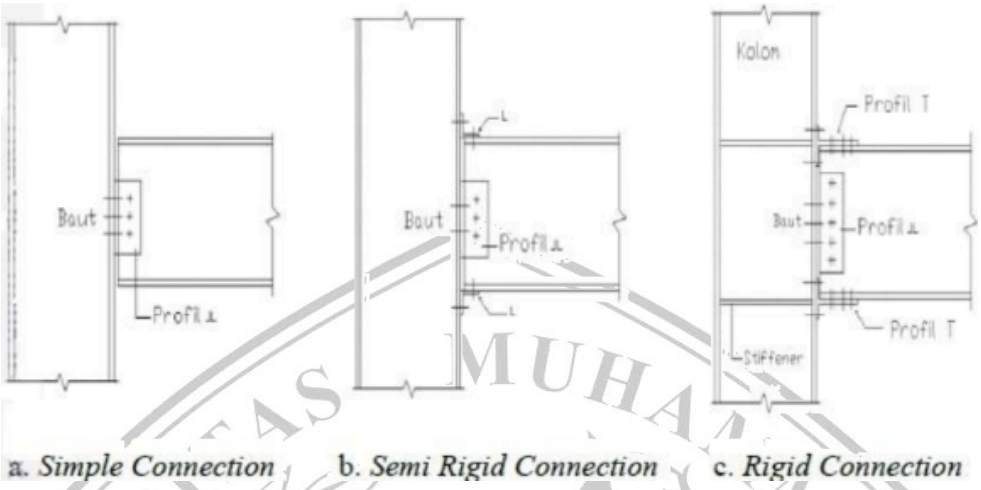
Sambungan dapat dinyatakan sebagai komponen fisik yang secara mekanis mengikat elemen struktur dan terkonsentrasi pada lokasi pengikatan terjadi. Hal ini penting dalam meneruskan gaya momen dari elemen struktur ke elemen pendukung. Sendi didefinisikan sebagai penghubung dan zona interaksi antara anggota terhubung dan panel zona dari *web* kolom. Sambungan untuk struktur baja *hot – rolled* dibagi menjadi sambungan baut dan sambungan las. Sementara untuk baja *cold – formed*, ada sembilan jenis sendi yang umum digunakan, yaitu baut, *self – tapping screws*, *pin*, pengelasan ditempat, *puddle welding*, *clinching*, *self – piercing rivets*, dan paku. Terdapat tiga jenis sambungan, yaitu sambungan kaku, sambungan semi kaku, dan sambungan sendi.

1. Sambungan kaku/*rigid connection*, adalah sambungan yang tidak memiliki kekakuan yang cukup untuk mempertahankan sudut – sudut diantara komponen – komponen struktur yang akan disambung.

2. Sambungan semi kaku/*semi rigid connection*, adalah sambungan yang tidak memiliki kekakuan yang cukup untuk mempertahankan sudut – sudut diantara komponen – komponen struktur yang disambung, namun harus dianggap memiliki kapasitas yang cukup untuk memberikan kekangan yang dapat diukur terhadap perubahan sudut – sudut tersebut.

3. Sambungan sendi/*simple connection*, adalah sambungan yang pada kedua ujung komponen struktur dianggap bebas momen. Sambungan sendi harus dapat berubah bentuk agar dapat memberikan rotasi yang diperlukan pada sambungan.

Sambungan tidak boleh mengakibatkan momen lentur terhadap komponen struktur yang disambung.



Gambar 2. 21 Sambungan Pada Baja

Sumber: SNI 7972-2020

2.9.10.1 Sambungan Baut

Terdapat 3 macam sambungan pada konstruksi baja, yaitu: sambungan baut, sambungan las, dan sambungan paku keeling (*rivet*). Namun yang sering digunakan di lapangan ialah 2 sambungan awal. Dua konsep utama telah muncul dalam menyediakan respon daktilitas yang tinggi dan kinerja yang andal yakni, memperkuat sambungan dan atau memperlemah framing balok ke kolom, dengan tujuan menghindari kerusakan kolom Sambungan sangat penting diperhatikan karena perannya sebagai titik tumpu dari beban yang diterima Gedung

Penggunaan baut pada struktur baja dapat mempercepat proses pelaksanaan dan tidak memerlukan kemampuan tinggi bagi pekerja disbanding dalam sambungan *rivet* dan las. Hal ini menyebabkan struktur baja dengan sambungan baut lebih ekonomis. (Sulistiyo, 2019)

1. **Dasar Perencanaan Baut**

Salah satu yang membedakan struktur baja dengan yang lainnya terletak pada perencanaan sambungannya. Salah satu sambungan pada struktur baja yang digunakan adalah sambungan baut. Meskipun sambungan baut saat ini sudah banyak banyak digunakan. Tetapi harus tetap diperhatikan kelebihan dan kegagalan yang dimilikisambungan baut. Adapun kelebihan yang dimiliki sambungan baut

antara lain (Yudha Lesmana, 2021) :

- Pemasangannya lebih mudah, cepat dan tidak diperlukan keahlian khusus untuk pemasangannya
- Jika dibandingan dengan sambungan las, untuk upah pekerja harganya lebih ekonomis
- Harga peralatan untuk pemasangan sambungan baut relatif lebih murah

Dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 tabel J3.2, kuat nominal pengencang bautpada bagian ulir adalah sebagai berikut :

Tabel 2. 10 Tipe-tipe Baut

Deskripsi Pengencang	Kekuatan Tarik Nominal, Fnt (Mpa)	Kekuatan Geser Nominal, Fnv (Mpa)
Baut A307	310	186
Baut A325 (ulir berada di bidang geser)	620	372
Baut A325 (ulir berada di luar dibidang geser)	620	469
Baut A490 (ulir berada di bidang geser)	780	469

Sumber : SNI 1729-2020

2. Tahanan Nominal Baut

Berdasarkan SNI 1729-2020 untuk baut yang memikul beban terfaktor Ru, harus memenuhi persyaratan;

$Ru \leq ØRn$ .....(2.30a)

Dengan Rn adalah tahanan nominal baut dan Ø adalah faktor reduksi sebesar 0,75. Besarnya Rn berbeda untuk masing – masing jenis baut

3. Kekuatan Tarik dan Geser Baut

Kekuatan tarik atau geser desain, ϕRn, dan kekuatan tarik atau geser izin, Rn /Ω, pada baut yang dikencangkan pas atau baut kekuatan tinggi pratarik atau bagian berulir harus ditentukan sesuai dengan keadaan batas keruntuhan tarik dan keruntuhan geser sebagai berikut:

$Rn= Fn . Ab$ .....(2.30b)

Dengan

Ab: luas tubuh baut tidak berulir nominal atau bagian berulir (mm^2)

Fn: tegangan tarik nominal, Fnt atau tegangan geser, Fnw ksi (Mpa)

4. Kuat Geser Blok

Analisa geser blok (*block shear*) dilakukan agar pada bagian lubang baut tidak mengalami geser sehingga terjadi kegagalan. *Block shear* sangat dipengaruhi oleh posisi dan jarak antar baut. Jika dibandingkan dengan mekanisme tumpu yang jumlah bautnya relatif sedikit, maka kebalikannya untuk sambungan ini yaitu jumlah baut yang dipakai ralatif banyak. Dengan penempatan baut secara bekerlompok, maka saat terjadi keruntuhan blok dapat berakibat pada satu kelompok. Berikut adalah persamaan untuk kekuatan desain pada saat keadaan batas keruntuhan *block shear* berdasarkan SNI 1729:2020 :

$Rn = (0{,}60\ Fu \times A_{ny}) + (U_{bs} \times Fu \times A_{nt}) \leq (0{,}60 \times Fv \times A_{gy}) + (U_{bs} \times Fu \times A_{nt})$

Keterangan :

U_{bs} = 1,0 jika tegangan tarik tidak seragam

= 0,5 jika tegangan yang mengalami geser

A = Luasan neton yang mengalami geser

Ø = 0,75

5. Mekanisme Slip Kritis Baut

Merupakan sambungan yang direncanakan tidak akan mengalami slip. Sambungan jenis ini direncanakan terhadap sebuahstruktur yang akan menerima beban dinamik.

Tahanan slip-kritis nominal (Rn) untuk baut mutu tinggi adalah sebagai berikut:

$Rn = \mu \cdot Du \cdot hf \cdot Tb \cdot ns$ .....(2.31a)

keterangan:

μ = koefisien *slip* rata-rata, tergantung kondisi permukaan. Pekerjaan persiapan mutu kelas-A adalah μ=0,3 dan untuk mutu kelas-B (lebih ketat) adalah μ =0,5

Du = 1,13, adalah faktor pengali yang mempresentasikan gaya prategang baut rata-rata terpasang dengan gaya tarik baut prategang minimum

hf = faktor terkait adanya pelat pengisi (*filler*), jika tidak ada *filler* atau hanya 1 *filler* maka hf = 1, jika ada 2 *filler* diantara pelat sambung maka hf = 0,85

Tb = gaya tarik baut prategang minimum

ns = jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kontak

Kuat batas slip-kritis, Ru = ØRn, dimana nilai Ø tergantung bentuk dan ukuran lubang bautnya. Jika lubang standar atau lubang slot pendek yang dipasang tegak lurus arah beban, Ø = 1,0. Untuk lubang *oversize* dan slot pendek tetapi dipasang sejajar arah beban maka Ø = 0,85. Jika lubangnya adalah slot-panjang maka Ø= 0,70.

Tabel 2. 11 Pratarik Baut Minimum (kN)

Ukuran baut, mm	Kelompok A (Baut A325)	Kelompok B (Baut A490)
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334

Sumber: SNI 1729:2020

6. Kuat Tumpu Baut

Kuat tumpu pelat sambungan memperhitungkan pengaruh *deformasi*. Jika besarnya itu akan mempengaruhi fungsi struktur sehingga kekuatannya perlu dibatasi maka dapat dipakai rumusan berikut dengan mengambil nilai yang terkecil.

Rn = 1,2 . lc . t . Fu ≤ 2,4 . d . t . Fu .....(2.31b)

Selanjutnya jika terjadi *deformasi* pada sambungan dianggap tidak mempengaruhi fungsi maka kuat tumpu dapat ditingkatkan yaitu nilai terkecil persamaan berikut:

Rn = 1,5 . lc . t . Fu ≤ 3,0 . d . t . Fu .....(2.31c)

dimana:

lc = jarak bersih (mm) searah gaya, dihitung dari tepi lubang ke tepi pelat terluar (untuk baut pinggir) atau jarak bersih antar tepi lubang (untuk baut dalam)

Fu = kuat tarik minimum baja pelat yang ditinjau (MPa) Untuk kuat tumpu dengan lubang baut tipe slot panjang yang arah slotnya tegak lurus arah gaya, maka kekuatannya berkurang dan dapat dihitung sebagai berikut:

Rn = 1,0 . lc . t . Fu ≤ 2,0 . d . t . Fu .....(2.31d)

7. Perhitungan Jarak Antar Baut

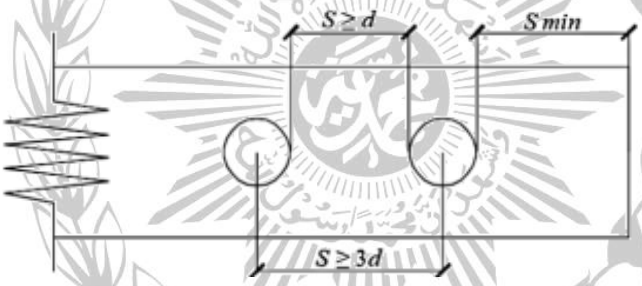
Dalam pemasangan baut harus diperhatikan jarak antara baut satu dengan yang lainnya. Hal ini agar baut dapat memikul beban sesuai dengan kekuatnnya dan

mempermudah saat pemasangan. Pedoman untuk menentukan jarak antar baut menggunakan SNI 1729:2020. Adapun penjelasan tersebuat adalah:

• Spasi minimum Dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 pasal J3.3, jarak as ke as antar lubang baut tidak boleh kurang dari 2 2 3 ⁄ kali diameter nominal (d) dan jarak bersih antar lubang baut tidak boleh kurang dari d. Pada saat dilapangan, jarak 2,23 ⁄ lebih sering dibulatkan mendai 3. Sehingga untuk jarak as ke as dapat digunakan S ≥ 3d.

• Jarak tepi minimum Jarak pusat lubang baut ke tepi sambungan tidak bisa kurang dari nilai yang sudah ditetapkan pada SNI 1729:2020 tabel J3.3 dan J3.3M. Hal ini agar posisi baut tidak terlalu dekat dengan tepi yang bisa menyebabkan sobek pada profil baja.

• Spasi maksimum Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal J3.5, jarak maksimum dari pusat lubang baut ke tepi yang terdekat pada bagian yang tersambung harus 12 kali ketebalan dari bagian yang disambung, namun tidak boleh lebih dari 150 mm



Gambar 2. 22 Jarak Antar Baut
Sumber: SNI 1729-2020

2.9.10.2 Sambungan Las

Suatu proses penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan dipanaskan hingga suhu yang tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi

a. Jenis Sambungan Las

Las tumpul, las ini digunakan untuk menyambung batang – batang sebidang, karena las ini harus menyalurkan secara penuh beban yang bekerja, maka las ini haruslah memiliki kekuatan yang sama dengan bidang yang disambung. Las sudut, tipe las ini paling banyak ditemui dibandingkan jenis las yang lain, 80% sambungan las menggunakan las sudut karena tidak memerlukan presisi dalam

pengerjaannya. Las baji dan pasak, jenis las ini biasanya digunakan bersama – sama dengan las sudut, manfaat utamanya adlaah menyambungkan gata geser pada sambungan lewatan bila ukuran panjang las sudut.

b. Tahanan Nominal

Persyaratan keamanan suatu struktur dalam hal ini adalah terpenuhinya persamaan: $\phi Rnw \geq Ru$ .....(2.32)

Kuat rencana per satuan panjang las sudut, ditentukan sebagai berikut :

$Ø_{Rnw}$ = 0,75 . te (0,6 . f_{uw}) (las)

$Ø_{Rnw}$ = 0,75 . te (0,6 . fu) (bahan dasar)

Dimana : Ø = faktor ketahanan

R_{nw} = tahanan nominal per satuan panjang las

Ru = beban terfaktor per satuan panjang las

2.9.10.3 Sambungan Pada Bracing

Dalam perencanaan sambungan bracing gaya horizontal yang diperhitungkan hanya gaya tarik saja, hal ini dikarenakan sambungan bracing dianggap mampu menahan gaya tekan yang terjadi. Gaya tarik yang terjadi kemudian di distribusikan ke sayap dan badan bracing.

Kuat tumpu sayap brace dihitung dengan persamaan

ØRb= Øf . 2,4 . db .tfb . fu ≥ ØRn .....(2.33a)

Dimana :

ØRn = adalah geser baut (kips), db adalah diameter baut (in),

T = adalah tebal yang paling kritis menahan beban (in),

Fu = adalah tegangan Tarik baja struktur (kips) Ø= 0,75

Untuk menjamin kekuatan pelat sambung, maka pelat sambung haras dikontrol menurut persamaan

Kondisi leleh

Rn = 0,9 . Ag. Fy .....(2.33b)

Kondisi fraktur

Rn = 0,75 . fu. Ae .....(2.33c)

Kedua nilai (ØRn tersebut haras lebih besar dari P_{uf})

1. Pelat Sambung (*gusset plate*)

Kuat tumpu rencana tiap lubang baut dihitung dengan Pengecekan geser blok akibat transfer gaya dari badan dan gaya total:

Apabila, Fu. Ant > 0,6 . Fu. Ans maka,

ØRn = Ø(Fu. Ant + 0,6 . Fy . Ags) .....(2.33d)

Apabila, 0,6 . Fu. Ans > Fu. Ant maka,

ØRn = Ø(0,6 . Fu . Ant + fy . Agt) .....(2.33e)

Kontrol kuat tarik leleh pada daerah pertemuan *brace* dengan pelat sambung dapat dicari menurut persamaan

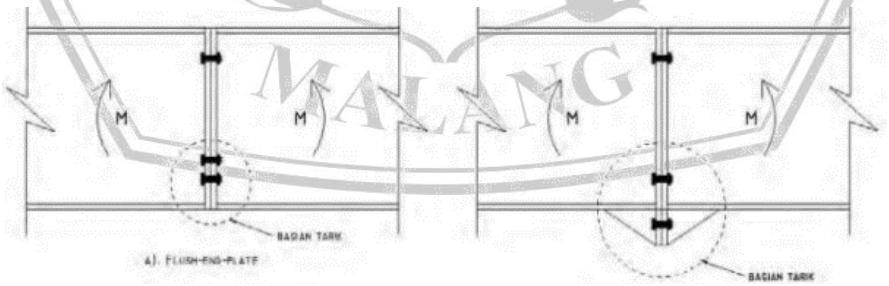
ØRn = ØFy . Aw .....(2.33f)

Kontrol kuat desain baut terhadap geser dan tarik dengan persamaan

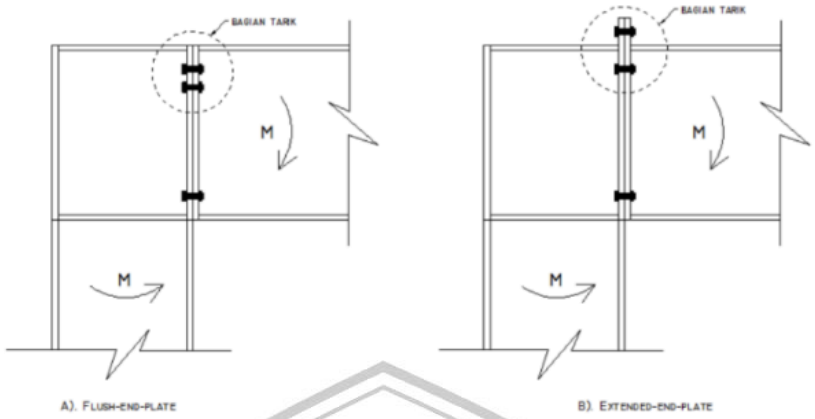
ØRn= Ø . 2,4 . dt . Fu > ØRn .....(2.33g)

2.9.10.4 Sambungan *End-Plate*

Suatu Struktur baja tidak terlepas dari elemen-elemen seperti balok dan kolom yang harus disambung. Sambungan merupakan bagian terlemah dari struktur baja. Kegagalan struktur baja dapat terjadi pada sambungan ataupun komponen penyambung. Sambungan baut tipe tarik memiliki jumlah baut yang relative sedikit, dan ada tambahan pelat khusus di las pada ujungnya sehingga sering disebut sebagai sambungan *end-plate*. Jika terpasang komponen sambungan saling menempel rapat dengan lawan sambungannya, yang bisa berupa *end-plate* juga, atau pelat sayap profil kolom. Aplikasi sambungan *end-plate* dapat dipasang untuk balok-balok atau portal kolom-balok (Hayati, 2017).



Gambar 2. 23 Sambungan *End Plate*
Sumber: SNI 7972-2020



Gambar 2. 24 Sambungan *End Plate*
Sumber: SNI 7972-2020

2.9.10.5 Sambungan Balok-Kolom

1. Bolted Untiffened End Plate (BUEP) Connection

BUEP adalah sambungan yang harus didesain sedemikian rupa sehingga saat terjadi leleh pada saat kombinasi balok lentur dengan *panel zone* atau leleh pada balok lentur saja. Pelat ujung, baut dan las harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak terjadi leleh pada elemen-elemen tersebut. Desain harus dilakukan dengan menggunakan langkah-langkah di bawah ini :

$Mf < 2\ Tub\ (d_0 + d_1)$.....(2.34a)

$T_{ub} = A_b \times F_{nt}$.....(2.34b)

Keterangan :

Mf = Momen rencana (kNm)

Tub = Gaya tarik yang terjadi (N)

d_0 = Jarak baut paling atas dengan sayap profil bagian bawah (mm)

d_1 = Jarak baut sayap bagian atas dengan sayap profil bagian bawah (mm)

Ab = Luat baut (mm^2)

Fnt = Kuat tarik nominal (Mpa)

Untuk mencegah kegagalan geser maka diperlukan ukuran baut yang sesuai dengan memastikan nilai Ab harus memenuhi :

$Ab \geq \frac{\frac{2\ Mf}{L-dc} + Vg}{3\ Fv}$.....(2.34c)

Keterangan :

dc = Lebar badan profil (mm)

Vg = Gaya geser nominal (kN)

Fv = Kuat geser nominal (Mpa)

Menentukan tebal pelat ujung minimum berdasarkan lentur dengan persamaan :

s = $\sqrt{b_p \; x \; g}$ .....(2.34d)

tp = $\sqrt{\frac{Mf}{0{,}8\, F_{yp}\left\{d_b - Pi\left[\frac{bp}{2}\left(\frac{1}{pf}+\frac{1}{s}\right)+(pf+s)\frac{2}{g}\right]+\frac{bp}{2}\left(\frac{db}{Pf}+\frac{1}{2}\right)\right\}}}$ .....(2.34e)

Keterangan :

B_p = Lebar pelat sambung (mm)

F_{yp} = Mutu pelat yang digunakan (Mpa)

d_b = Tinggi badan profil (mm)

Pi = Jarak bagian sayap atas profil dengan baut di bawahnya (mm)

Pf = jarak bagian sayap atas profil dengan baut di atasnya (mm)

Menentukan tebal pelat ujung minimum berdasarkan geser melalui persamaan :

Tp = $\frac{Mf}{1{,}1\; Fyp \; x \; bp\; (db - tbf)}$ ..... (2.34f)

Menentukan kebutuhan pengaku pada panel zone. Pelat pengaku tidak diperlukan bila memenuhi syarat berikut ini :

Tcf $\geq \frac{b_{bf}}{6}$ ..... (2.34f)

Keterangan :

b_{bf} = Ukuran sayap profil (mm)

tbf = Ukuran tebal profil (mm)

Fyb = Mutu pelat yang digunakan (Mpa)

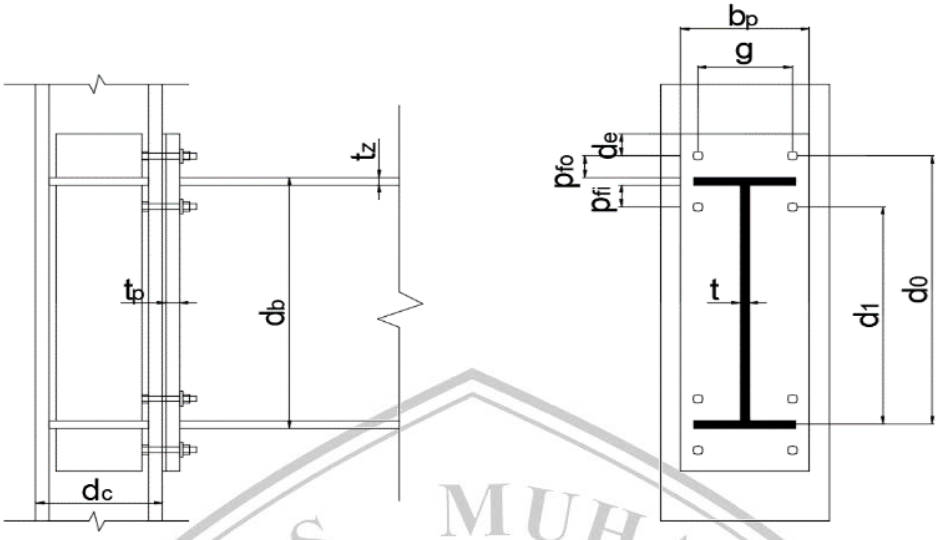
Tetapi jika persamanaan diatas tidak terpenuhi, maka tebal pelat pengaku dapat dihitung dengan persamanaa :

$t_2 \geq \frac{d_2 + W_2}{90}$ .....(2.34g)

Keterangan :

d_2 = Tinggi badan profil (mm)

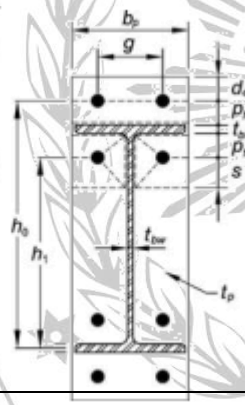
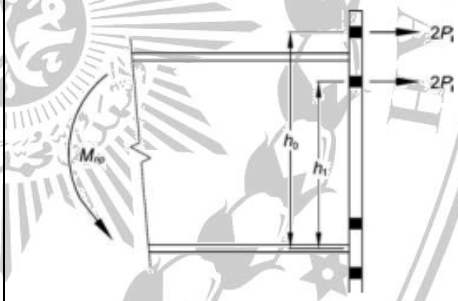
W_2 = Lebar badan profil (mm)



Gambar 2. 25 Konfigurasi Sambungan BSEP

Sumber: SNI 7972-2020

Tabel 2. 12 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Pelat Ujung Diperpanjang Tanpa Pengaku Dengan Empat Baut

Geometri Pelat-Ujung dan Pola Garis Leleh	Model Gaya Baut
	

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{S}\right) + h_0\left(\frac{1}{p_{f0}}\right) - \frac{1}{2}\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(p_{fi} + s\right)\right] \text{.....(2.34h)}$$

S = $\frac{1}{2}\sqrt{b_p\ x\ g}$ catatan : Jika $p_{fi} > s$, gunakan $p_{fi} = s$ .....(2.34i)

2. Stiffened End Plate Connection

Sambungan ini harus didesain sedemikian rupa sehingga saat terjadi lelehpada saat kombinasi balok lentur dengan *panel zone* atau leleh pada balok lentur saja. *Desain* harus dilakukan dengan menggunakan langkah-langkah di bawah ini :

$Mf = Mpr + Vu \times Sh$ .....(2.35a)

$Mpr = Cpr \times Zx \times Ry \times Fy$

$C_{pr} = \frac{fy+fu}{2\ x\ fy} < 1{,}2$ ..... (2.35b)

$Vu = 2\ x\ \frac{Mpr}{Lh} \pm$ v gravitasi ..... (2.35c)

a. Desain Bagian Balok

Panjang Pelat Pengaku pelat ujung

Lst $= \frac{Hst}{tan30}$ (2.35d)

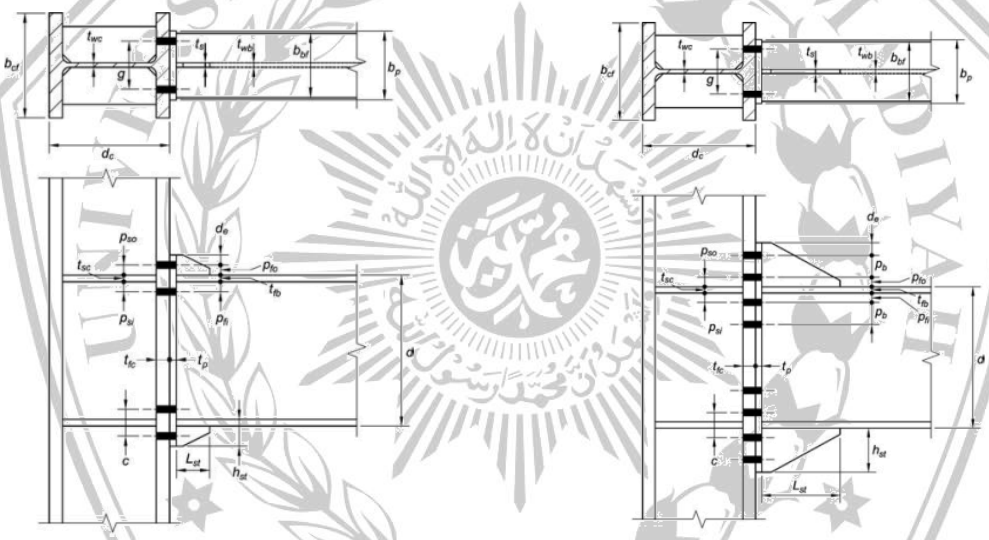
Sh = tp + Lst

Desain ketebalan pengaku pelat ujung

Ts > tbw $(\frac{fyb}{fys})$ (2.35e)

Pemeriksaan Tekuk pada pengaku pelat ujung

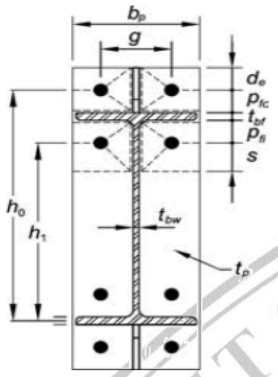
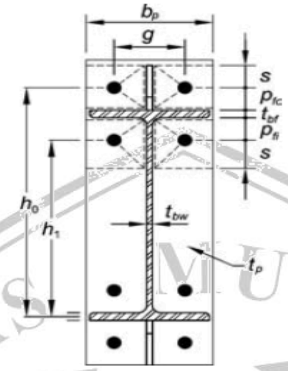
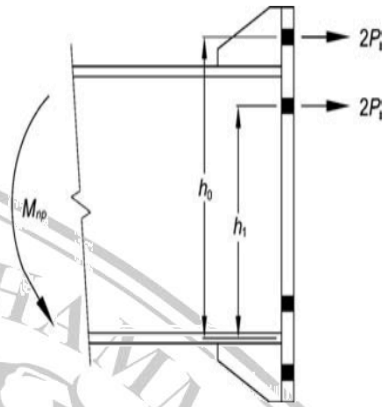
$\frac{hst}{ts} < 0{,}56\ \sqrt{\frac{E}{fys}}$ (2.35f)



Gambar 2. 26 *Stiffened End Plate Connection* 4Es dan 8 Es

Sumber: SNI 7972-2020

Tabel 2. 13 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Pelat Ujung Diperpanjang Tanpa Pengaku Dengan Empat Baut

Geometri Pelat – Ujung dan Pola Garis Leleh		**Model Gaya Baut**
Kasus 1 ($d_e \leq s$)	**Kasus 2 ($d_e > s$)**	
		

Untuk kasus 1 ($d_e \leq s$),

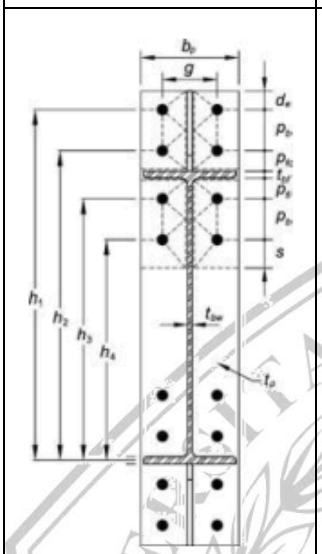
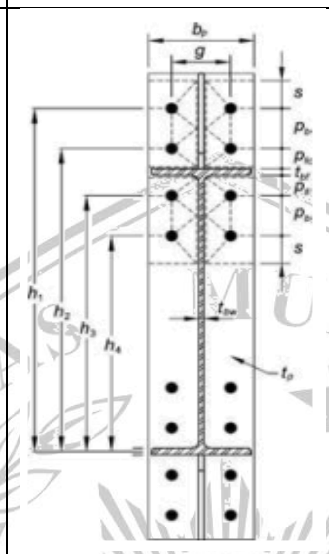
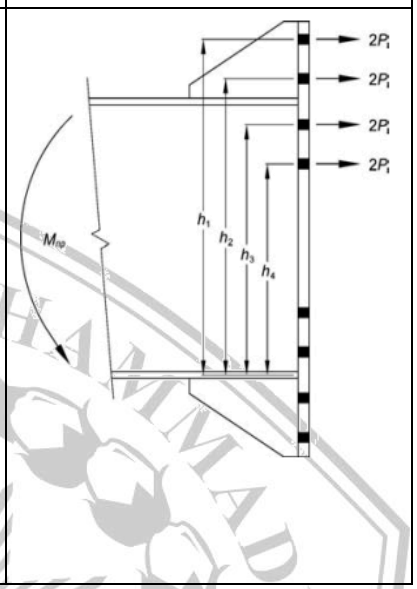
$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s}\right) + h_0\left(\frac{1}{p_{fo}} + \frac{1}{2s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1(p_{fi} + s) + h_0(d_e + p_{fo})\right] \quad (2.35d)$$

Untuk kasus 2 ($d_e > s$),

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s}\right) + h_0\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{fo}}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1(p_{fi} + s) + h_0(s + p_{fo})\right] .. \quad (2.35e)$$

$S = \frac{1}{2}\sqrt{b_p x g}$ Catatan : Jika $p_{fi} > s$, gunakan $p_{fi} = s$ `

Tabel 2. 14 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Pelat Ujung Diperpanjang Dengan Pengaku Dengan Delapan Baut

Geometri Pelat – Ujung dan Pola Garis Leleh		**Model Gaya Baut**
Kasus 1 ($d_e \leq s$)	**Kasus 2 ($d_e > s$)**	
		

Kasus 1 ($d_e \leq s$)

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{2d_e}\right) + h_2\left(\frac{1}{p_{fo}}\right) + h_3\left(\frac{1}{p_{f1}}\right) + h_4\left(\frac{1}{s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(d_e + \frac{3p_b}{4}\right) + h_2\left(p_{fo} + \frac{p_b}{4}\right) + h_3\left(p_{f1} + \frac{3p_b}{4}\right) + h_4\left(s + \frac{p_b}{4}\right)\right] + g \text{ ..... (2.35f)}$$

Kasus 2 ($d_e > s$)

$$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}\right) + h_2\left(\frac{1}{p_{fo}}\right) + h_3\left(\frac{1}{p_{f1}}\right) + h_4\left(\frac{1}{s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(s + \frac{p_b}{4}\right) + h_2\left(p_{fo} + \frac{3p_b}{4}\right) + h_3\left(p_{f1} + \frac{p_b}{4}\right) + h_4\left(s + \frac{3p_b}{4}\right)\right] + g \text{ .....(2.35g)}$$

$S = \frac{1}{2}\sqrt{b_p x g}$ Catatan : Jika $p_{fi} > s$, gunakan $p_{fi} = s$ .....(2.35h)

Keterangan :

F_{up} = tegangan tarik minimum terspesifikasi dari pelat ujung, ksi (Mpa)

A_n = luas netto pelat ujung

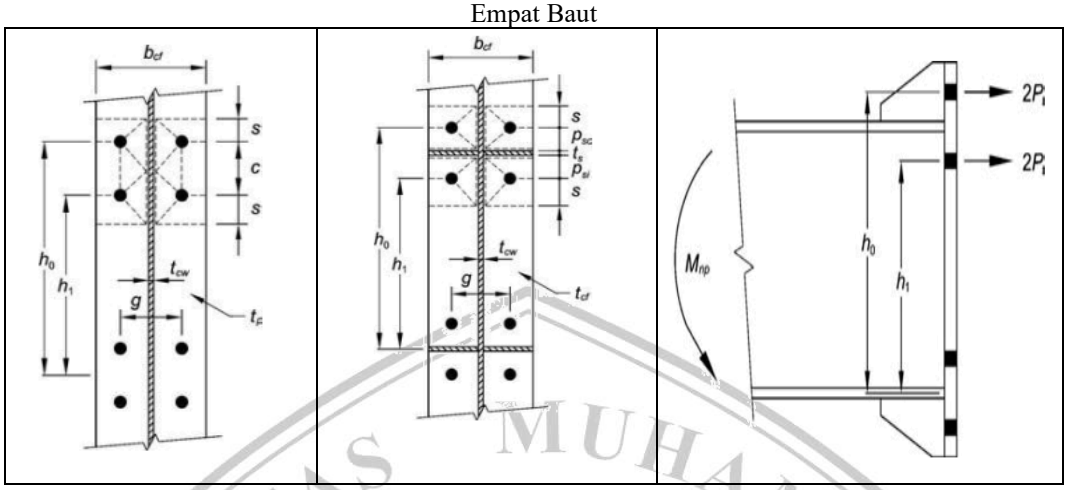
= T_p, $\left[b_p - 2(d_b + \frac{1}{8})\right]$ bila lubang – lubang standar digunakan, in

= T_p, $\left[b_p - 2(d_b + \frac{1}{8})\right]$ bila lubang – lubang standar digunakan, mm^2

d_b = diameter baut, in (mm)

c. Desain Bagian Kolom

Tabel 2. 15 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Sayap Kolom Diperpanjang Dengan Empat Baut



Sayap Kolom Tanpa Pengaku

$Y_c = \frac{bcf}{2}$(h1($\frac{1}{S}$ + h0$\frac{1}{S}$) + $\frac{2}{g}$(h1 ($S + \frac{3C}{4}$) h0+(($S + \frac{C^2}{4}$)) $\frac{2}{g}$

.....(2.35i)

Sayap Kolom Diperkaku

$Y_c = \frac{bcf}{2}$(h1($\frac{1}{S} + \frac{1}{psi}$) + h0 ($\frac{1}{S} + \frac{1}{ps0}$)) + $\frac{2}{g}$x (h1 x (S+psi)h0 (S+$ps0$)

S = $\frac{1}{2}\sqrt{b_p xg}$ Catatan : Jika p_{fi} > s, gunakan p_{fi} = s .....(2.35j)

Pemeriksaan Ketebalan Sayap Kolom

Tcfmin = $\sqrt{\frac{1{,}11\ Mf}{1\ x\ fyc\ x\ yc}}$ < tcf

Pemeriksaan Kuat lentur Sayap kolom tanpa pelat menerus

$ØdMcf$ = $Ød \times Fyc \times Yc \times tcf^2$

Memeriksa kekuatan pelelehan badan kolom tanpa pelat penerus

$ØdRn = Ød \times Ct \times (6kc+tbf+2tp) \times Fyc \times tcw$

Ct = 1

$Ød$ = 1

Kc = jarak dari sisi terluar sayap IWF sampai ujung penebalan badan

Memeriksa kekuatan tekuk badan kolom tanpa pelat penerus

$Ffu \leq ØR$n

Rn = $\frac{24\ x\ t^3 x\sqrt{Efyc}}{h}$

Memeriksa Lipat Badan Kolom tanpa Plat menerus

Rn = 0,8 x t^2cw(1+3x($\frac{N}{dc}$)x($\frac{tcw}{tcf}$)x1,5)x $\sqrt{\frac{ExFycXtcf}{Tcw}}$

3. *Bolted Flange Plate* (BFP) *Connection*

Pada BFP, ketebalan *panel zone* tidak melebihi kekuatan dari *panel zone* untuk sambungan ini. Jika ketebalan *zona panel* lebih dari 1,5 kali yang dibutuhkan, disarankan untuk menggunakan kombinasi ukuran balok dan kolom yang berbeda. Menentukan ketebalan minimum *flens* pelat yang diperlukan dengan persamaan :

$$tpl = \frac{d_b - \sqrt{d_b^2 - \frac{4,4\ Myf}{Fy\ x\ b_p}}}{2} \quad \text{.....(2.36a)}$$

Untuk mencegah kegagalan penampang neto dan kegagalan perpanjangan lubang baut, maka sebuah baut harus memenuhi persamaan :

1,2 Myf < M*fail*

Keterangan :

M_{yf} = Momen di ujung kolom saat terjadi leleh pada sayap balok (N-mm)

M_{fail} = Momen di ujung kolom pada saat terjadi kegagalan (N-mm)

Menentukan M_{fail} untuk kegagalan geser baut :

Mfailbolt = 2_N x Ab x Fy_{bolt} x d_b x lL_{TFI}

L_{TFI} $\frac{L - d_c}{L - d_c - (2s1 + s3)}$ (2.155) ..... …(2.36b)

Keterangan :

Fv_{bolt} = Kekuatan geser nominal baut (N)

L_{TF1} = Rasio panjang untuk meneruskan momen dari pusat baut ke ujung kolom

S_1 = Jarak profil kolom ke baut pertama (mm)

Menentukan M_{fail} untuk patah penampang netto pelat sayap :

Mfail yf = 0,85 $F_{u\text{-}pl}$ x $\left[b_p - 2(d_{bt\ bolt} + 0,062)\right]\ x\ tpl\ x\ \left(d_b + t_{pl}\right) x\ L_{tf2}$(2.36c)

L_{TF2} = $\frac{L - d_c}{L - d_{c-2} - 2s1}$ .....(2.36c)

Keterangan :

d_{bt} = Diameter baut (mm)

L_{TF2} = Rasio untuk meneruskan momen pada lubang baut yang paling dekat dengan ujung kolom

Menentukan M_{fail} muka kolom untuk patah penampang netto dari sayap balok :

$M_{fail} = F_{u\text{-}b} \times [Z_b - 2 \times (d_{bt\ hole} + 0,062) \times t_{fb} \times (d_b - t_{fb})] \times L_{TF3}$..... (2.36d)

$L_{TF3} = \frac{L-d_c}{L-d_c-2(s1+s2)}$ .....(2.36e)

Keterangan :

$d_{bt\ hole}$ = Diameter lubang baut (mm)

L_{TF3} = Rasio untuk meneruskan momen dari lubang baut terjauh dari ujung kolom ke ujung kolom

Menentukan M_{fail} pada muka kolom untuk pemanjangan lubang baut:

M_{fail}= Tn x $\left(d_b + \frac{t_{PL-t}+t_{PL-b}}{2}\right)$ x L_{TF1} .....(2.36f)

Dimana nilai Tn diambil yang terkecil dari kedua persamaan ini

Tn = 2,4 $F_{u-b}\ x\ (S_3 + S_1 - c)$ x t_{fb} .....(2.36g)

Tn= 2,4 F_{u-pl} x $(S_3 + S_4)$ x t_{pl} .....(2.36h)

Memeriksa geser blok untuk memastikan bahwa momen pada ujung kolom sesuai dengan syarat sambungan. Pada desain pelat tunggal, sambungan *shear-tab* yang dibaut cukup menahan geser yang diberikan :

$V_{web} = \frac{2M_f}{L-d_c} + V_g$ .....(2.36i)

Menentukan tebal pelat ujung terspesifikasi, tp

T_p, req = $\sqrt{\frac{1,11\ Mf}{\phi.b.F_{yp}Y_p}}$ .....(2.37)

Keterangan :

F_{yp} = tegangan leleh minimum terspesifikasi material pelat-ujung, ksi (MPa)

Y_p = parameter mekanisme garis leleh pelat-ujung dari Tabel 6.2, 6.3 atau 6.4, in. (mm)

Ød = 1,0

Tabel 2. 16 Pembatasan Parametrik pada Prakualifikasi

	Tanpa pengaku dengan Empat-Baut (4E)		Dengan pengaku dengan Empat-Baut (4ES)		Dengan pengaku dengan Delapan-Baut (8ES)	
Parameter	**Maksimum in. (mm)**	**Minimum in. (mm)**	**Maksimum in. (mm)**	**Minimum in. (mm)**	**Maksimum in. (mm)**	**Minimum in. (mm)**
t_{bf}	¾ (19)	3/8 (10)	¾ (19)	3/8 (10)	1 (25)	9/16 (14)
b_{bf}	9 ¼ (235)	6 (152)	9 (229)	6 (152)	12 ¼ (311)	7 ½ (190)
d	55 (1 400)	13 ¾ (349)	24 (610)	13 ¾ (349)	36 (914)	18 (457)
t_p	2 ¼ (57)	½ (13)	1 ½ (38)	½ (13)	2 ½ (64)	¾ (19)
b_p	10 ¾ (273)	7 (178)	10 ¾ (273)	7 (178)	15 (381)	19 (229)
g	6 (152)	4 (102)	6 (152)	3 ¼ (83)	6 (152)	5 (127)
p_{fi} , p_{fo}	4 ½ (114)	1 ½ (38)	5 ½ (140)	1 ¾ (44)	2 (51)	1 5/8 (41)
p_b	-	-	-	-	3 ¾ (95)	3 ½ (89)

b_{bf} = lebar sayap balok, in. (mm)
b_p = lebar pelat-ujung, in. (mm)
d = tinggi penampang balok penyambung, in. (mm)
g = jarak horizontal antara baut-baut, in. (mm)
p_b = jarak vertikal antara baris baut sebelah dalam dan sebelah luar dalam sambungan 8ES, in. (mm)
p_{fi} = jarak vertikal dari bagian dalam dari suatu sayap tarik balok ke baris baut bagian dalam terdekat, in. (mm)
p_{fo} = jarak vertikal dari bagian luar dari suatu sayap tarik balok ke baris baut bagian luar terdekat, in. (mm)
t_{bf} = tebal sayap balok, in.(mm)
t_p = tebal pelat-ujung, in. (mm)

Sumber SNI 7972 : 2020

2.9.10.6 Kategori Plat Dasar Kolom

Plat dasar kolom pada konsep pembebanan LRFD didesain supaya kuat rencana lebih besar atau sama dengan kuat perlu dalam menahan beban Momen lentur (Mu), gaya geser (Vu) serta gaya aksial (Nu) untuk segala macam jenis kombinasi pembebanan yang disyaratkan. Secara geometris pelat dasar kolom ditunjukkan pada gambar berikut:

Gambar 2. 27 *Base Plate*

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

1. **Kuat tumpu beton**

   Kuat tumpu rencana yaitu Øc Pp, dengan Ø = 0,65. Adapun kuat tumpu nominal Pp tergantung dari luasan beton tumpuan yang tersedia sebagai berikut:

a. Luas beton = luas pelat landasan, maka:

Pp = 0,85. fc' . $A1$ .....(2.38a)

Atau dalam format tegangan tumpu nominal maka:

$fp(maks)$ = $\emptyset c$ 0,85. fc' .....(2.38b)

b. Luas beton tumpuan > luas pelat landasan yang besarnya merata pada semua sisi. Untuk itu kuat tumpu beton dapat ditingkatkan maksimum sampai dua kalinya :

Pp = 0,85. fc'. $A1$ $\sqrt{\frac{A2}{A1}} \leq$ 1,7 . fc ′ . A1 .....(2.38c)

$fp(maks)$ = $\emptyset c$ 0,85. fc' $\sqrt{\frac{A2}{A1}} \leq$ 1,7 . fc ′ .....(2.38d)

Dimana:

fc’ = tegangan leleh material pelat ujung

A1 = luas beton yang dibebani gaya konsentris. mm2

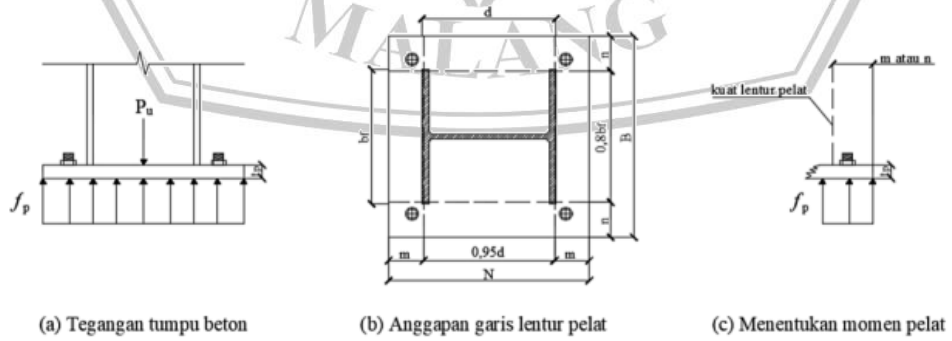
A2 = luas bawah piramida terpancung yang luas atas adalah A1, dimana sisi miringnya mempunyai rasio horizontal: vertikal adalah 2:1, mm2

Jika luas beton tumpuan > luas pelat landasan secara merata, maka bagian beton tumpuan yang lebih besar dapat berfungsi sebagai struktur pengekang untuk bagian beton yang dibebani. Itu mengapa kuat tumpunya bisa ditingkatkan lagi.

2. Tekan konsentris

Jika base-plate bertumpu pada permukaan beton pondasi, maka dimensi pelat landasan (BxN) harus dipilih agar beton dibawahnya tidak rusak, dengan memenuhi ketentuan berikut:

$fp = \frac{Pu}{BN} \leq fp$ (maks) .....(2.39a)



Gambar 2. 28 *Base Plate* Terhadap Beban Tekan Konsentris

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

Kuat perlu pada pelat landasan dapat ditentukan berikut:

$mpl = \frac{1}{2} fpl^2$ .....(2. 39b)

Dimana l adalah nilai terbesar dari m, n, dan λn'

$m = \frac{N-0,95d}{2}$ .....(2. 39c)

$n = \frac{B-0,8bf}{2}$ .....(2. 39d)

$\lambda n' = \frac{1}{4} \lambda \sqrt{dbf}$ .....(2. 39e)

$\lambda = \frac{2\sqrt{x}}{1+\sqrt{1-x}} \leq 1$ .....(2. 39f)

$x = \{\frac{4dbf}{(d+bf)^2}\} \frac{pu}{\emptyset cpp}$ .....(2. 39g)

Cukup konservatif jika diambil λ = 1 Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah:

Tp $\geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\emptyset Fy}} = l\sqrt{\frac{2fp}{\emptyset Fy}} = l\sqrt{\frac{2Pu}{\emptyset FyBN}}$ .....(2. 39h)

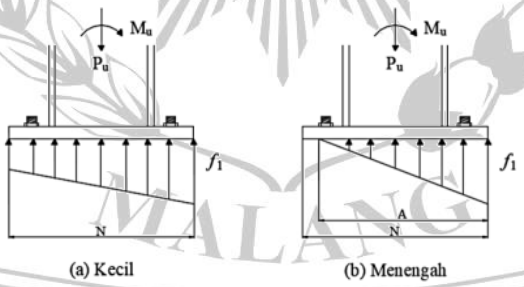
Dimana:

$\emptyset$ = factor ketahanan lentur, $\emptyset$ = 0,9

l = nilai maksimum dari m, n, dan λn ' , agar tebal pelat landasannya ekonomis maka parameter tersebut dibuat minimum, salah satunya adalah menetapkan *m =n*

3. Tegangan beton Segitiga-elastis

a. Momen kecil tanpa angkur



Gambar 2. 29 Distribusi Tegangan Segitiga Akibat Eksentrisitas Kecil

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

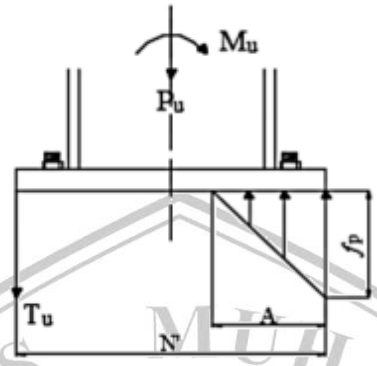
Pendekatan tegangan tumpu beton pada kondisi elastis (segitiga) sengaja dipilih karena memberi gambaran cukup rasional tentang efek eksentrisitas (e) akibat gaya tekan *Pu* terhadap *base-plate.* Nilai e disebut sedang jika tidak perlu baut angkur untuk keseimbangannya.

Maka nilai eksentrisitas (e) terbagi menjadi dua keadaan:

1. kecil, jika e = $\frac{Mu}{Pu} \leq \frac{N}{6}$ .....(2.40a)

2. Menengah jika e = $\frac{N}{6} \leq \frac{N}{2}$ .....(2.40b)

b. Momen besar dengan angkur



Gambar 2. 30 Distribusi Tegangan Segitiga Akibat Eksentrisitas Besar

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

Bila eksentrisitas gaya Pu besar, maka *base-plate* dapat terguling. Untuk menghidarinya harus dipasang baut angkur untuk menahan gaya tarik sebesar Tu akibat momen guling tersebut. Ukuran pelat landasan dipilih sedemikian sehingga tegangan tekan beton, fp tidak melebihi tegangan tumpu nominal beton. Untuk mencari nilai Tu dan A, dipergunakan persamaan keseimbangan vertikal dan momen sebagai berikut:

$Tu + Pu = \frac{1}{2} f_p AB$ .....(2.41a)

$Pu\ (\frac{N}{2} - x)$+Mu = $\frac{1}{2} f_p AB$ (N-x-$\frac{A}{3}$) .....(2.41b)

Jika A' =($\frac{N}{2}$ – x) dan $f' = f_n$ B $\frac{N-x}{2}$ dari persamaan diatas didapatkan;

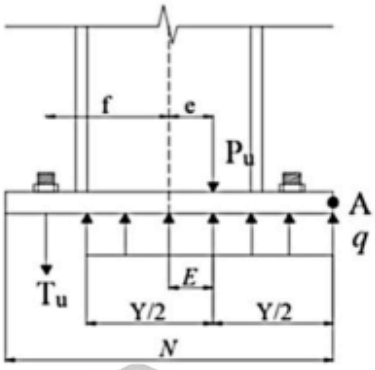
A = $\frac{f' \pm \sqrt{f' 2fp\ B\ (PuA' + Mu)}}{\frac{1}{2} fpB}$ .....(2.41c)

nilai A ≤ N', jika tidak memenuhi maka ukuran pelat landas tidak mencukupi, perlu ukuran lain. Gaya tarik baut angkur adalah:

Tu = $\frac{1}{2}\ fp\ AB - Pu$ .....(2.41d)

4. Tegangan beton persegi - *Ultimate*

a. Momen Kecil Tanpa Angkur



Gambar 2. 31 Dsitribusi Tegangan Persegi Akibat Eksentrisitas Kecil

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

Perencanaan *base-plate* dengan beban eksentris bisa berdasarkan asumsi distribusi tegangan beton berbentuk segitiga atau kondisi tegangan elastis. Jika beban bertambah sampai kondisi batas, perilaku elastis terlewati dan masuk kondisi inelastis, yaitu beton pada kondisi batas (*ultimate*)

$q_{maks} = Fp_{(maks)} \cdot B$ .....(2.42a)

$ymin = \frac{Pu}{2qmaks}$ .....(2.42b)

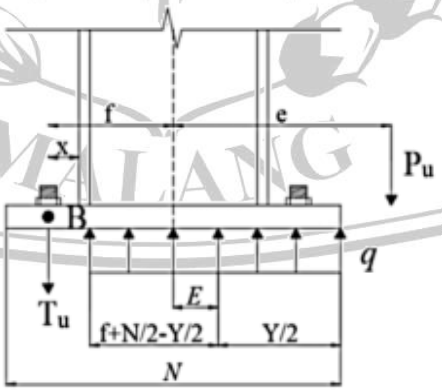
jika ε jarak resultan tumpu beton terhadap pusat berat kolom:

$\varepsilon maks = \frac{N}{2} - \frac{ymin}{2} = \frac{N}{2} - \frac{Pu}{2qmaks}$ .....(2.42c)

$ekritis = e_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{Pu}{2qmaks}$ .....(2.42d)

eksentrisitas beban ≤ ekritis maka baut angkur tidak diperlukan.

b. Momen Besar Dengan Angkur



Gambar 2. 32 Ditribusi Tegangan Persegi Akibat Eksentrisitas

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

Jika eksentrisitas beban tekan $e = Mu+Pu > ekritis$ maka baut angkur diperlukan untuk mencegah *base plate* mengalami puntir. Untuk mencari nilai T_u dan Y, dipergunakan persamaan keseimbangan gaya vertikal sebagai berikut:

$Tu + Pu = qY$ .....(2.43a)

$Tu + Pu = \frac{1}{2} f_p AB$ .....(2.43b)

$Q_{maks}\, Y\frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f - Pu\,(e + f) = 0$ .....(2.43c)

setelah pengaturan diperoleh persamaan kuadrat berikut:

$Y^2 - 2(\frac{N}{2} + f)Y + \frac{2Pu\,(e+f)}{2qmaks} = 0$ .....(2.43d)

Dan penyelesaian untuk Y adalah:

$Y = (\frac{N}{1} + f)\sqrt{(\frac{N}{1} + f)^2 - \frac{2Pu\,(e+f)}{qmaks}}$ .....(2.43e)

Pada suatu kombinasi gaya, momen dan ukuran *base plate* tidak diperoleh penyelesaian, sehingga dimensi *base plate* perlu diperbesar. Agar persamaan bisa diselesaikan, maka:

$(\frac{N}{1} + f)^2 \geq \frac{2Pu\,(e+f)}{2qmaks} = 0$ .....(2.43f)

Gaya pada angkur adalah:

$Tu = qY - Pu$ .....(2.43g)

Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah

$Tp \geq \sqrt{\frac{4MPL}{ØFy}}$ .....(2.43h)

Pada kondisi desak: momen terjadi akibat tegangan reaksi beton pada kantilever m dari tumpuannya.

Jika Y ≥ m, maka:

$tp \geq \sqrt{\frac{4MPL}{ØFy}} = \sqrt{\frac{2(1/2\ fp\ m2)}{0{,}9\ .\ Fy}} = 1{,}5\ .\ m\sqrt{\frac{Fp}{Fy}}$ .....(2.43i)

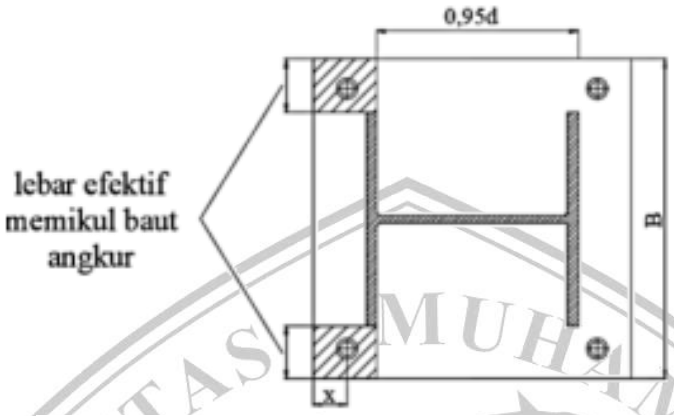
Jika Y < m, maka:

$tp \geq \sqrt{\frac{4MPL}{ØFy}} = \sqrt{\frac{4(fy\left(m\frac{y}{2}\right))}{0{,}9\ .\ Fy}} = 2{,}11\ .\ m\sqrt{\frac{fpy\left(m\frac{y}{2}\right))}{Fy}}$ .....(2.43j)

Dimana

$fp = \frac{Pu}{By}$

Pada sisi Tarik, momen terjadi akibat reaksi baut angkur yang bekerja seperti beban terpusat di pelat. Oleh sebab itu jumlah baut juga berpengaruh, khususnya terhadap lebar efektif pelat.



Gambar 2. 33 Lebar Efektif Pelat Pemikul Baut Angkur

Sumber: Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto

Tebal pelat landasan minimum untuk memikul baut angkur adalah:

$$tp \geq \sqrt{\frac{4MPL}{\emptyset Fy}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{Tu}{nb} \cdot \frac{a}{2a}\right)}{0{,}9\ .\ Fy}} = 1{,}5\ .\ \sqrt{\frac{Tu}{nb\ fy}} \quad \text{.....(2.43k)}$$

dimana:

nb = jumlah baut angkur yang dipasang.