

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Bangunan Struktur Baja

Salah satu jenis struktur yang dijelaskan dalam pedoman bangunan tahan gempa adalah struktur rangka baja. Dalam penerapannya, struktur baja banyak digunakan sebagai bangunan kilang minyak dan *warehouse*. Konstruksi prefabrikasi memiliki beberapa keuntungan, seperti metode konstruksi yang praktis dan cepat dan kualitas material yang terkontrol. Baja memiliki banyak keunggulan teknis, seperti kekuatan tinggi, keseragaman dan daya tahan yang optimal, elastisitas yang baik, sifat mampu bentuk yang memadai, dan sambungan konstruksi yang sederhana. Menurut Setiawan (2008), Ketika digunakan dalam struktur yang terbuat dari baja-beton komposit, ada beberapa keuntungan tambahan, seperti berat baja yang lebih rendah, tinggi profil yang lebih rendah, kekakuan plafon yang lebih tinggi, dan kemungkinan bentang yang lebih besar.

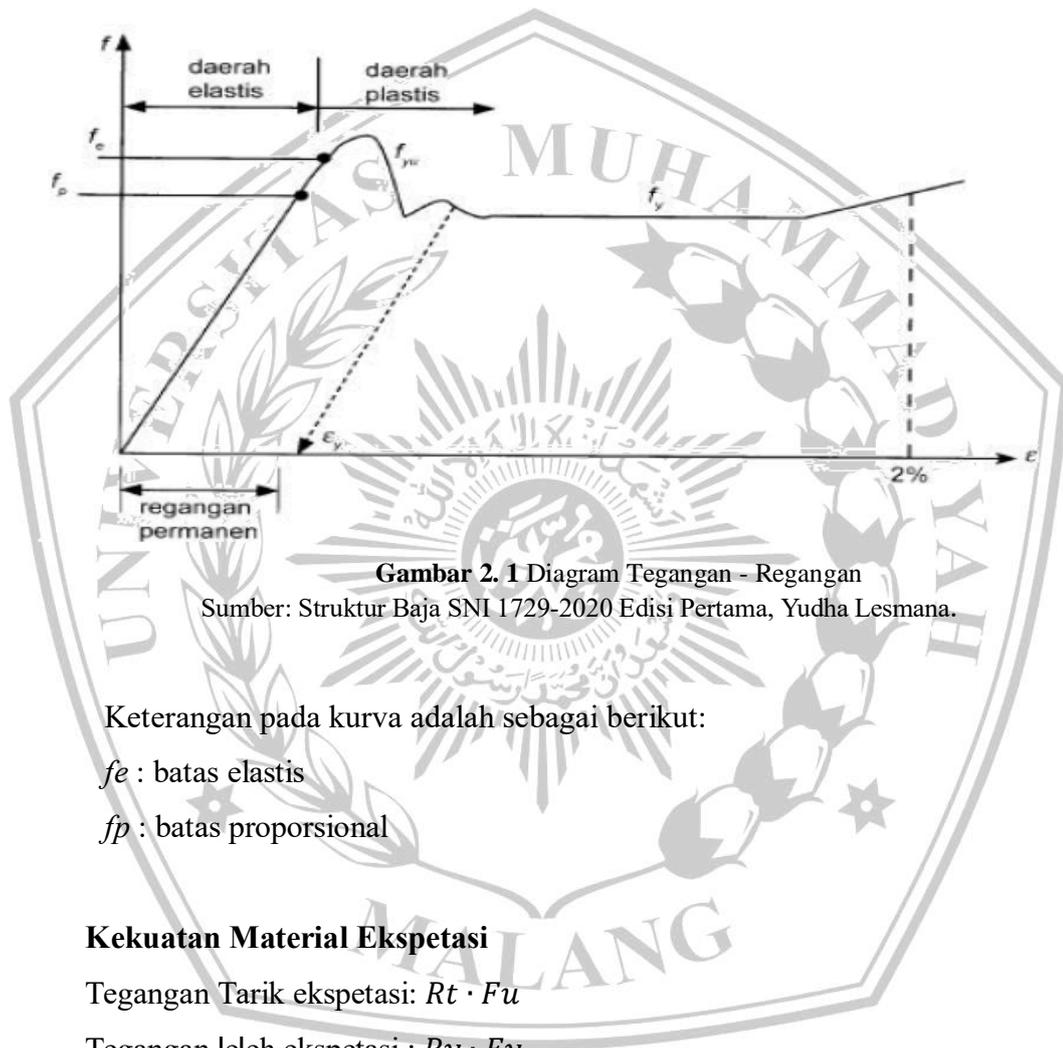
##### 2.1.1 Sifat Mekanik Baja

Menurut Setiawan (2008), material baja yang digunakan dalam konstruksi bangunan memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang berperan penting dalam menentukan kekuatan struktur bangunan secara keseluruhan. Sifat mekanis material baja adalah sebagai berikut:

- a. Kekakuan (*stiffness*), yang merupakan kemampuan material untuk bertahan terhadap tegangan tinggi tanpa mengalami deformasi yang signifikan. Kekakuan ini diukur melalui modulus elastisitas ( $E$ ), di mana baja memiliki nilai modulus elastisitas yang tinggi yaitu 200.000 MPa. Semakin tinggi modulus elastisitas suatu material, semakin kecil deformasi yang terjadi ketika menerima beban.
- b. Kapabilitas (*Strength*), yang menunjukkan ketahanan material terhadap tegangan sebelum mengalami kegagalan structural. Kapabilitas material baja ditentukan oleh beberapa parameter yaitu batas proporsional, titik lentur, dan tegangan maksimum yang dapat ditahan sebelum terjadi kegagalan.
- c. Elastisitas merupakan kemampuan material untuk kembali ke bentuk

aslinya setelah pembebanan dihentikan..

- d. Daktilitas yaitu kemampuan untuk mengalami deformasi ketika menerima beban tarik sebelum akhirnya mengalami kerusakan (*rupture*).
- e. Kegetasan merupakan sebuah material memiliki kecenderungan untuk patah secara tiba-tiba tanpa mengalami deformasi plastis.



**Gambar 2. 1** Diagram Tegangan - Regangan  
Sumber: Struktur Baja SNI 1729-2020 Edisi Pertama, Yudha Lesmana.

Keterangan pada kurva adalah sebagai berikut:

$f_e$  : batas elastis

$f_p$  : batas proporsional

### Kekuatan Material Ekspetasi

Tegangan Tarik ekspetasi:  $R_t \cdot F_u$

Tegangan leleh ekspetasi :  $R_y \cdot F_y$

Dengan:

$F_t$  : tegangan tarik minimum

$F_y$  : tegangan leleh minimum

$$R_y = \frac{F_{ye}}{F_y} = \frac{\text{Tegangan.leleh real}}{\text{tegangan.leleh nominal}} \dots\dots\dots(2.1a)$$

$$R_t = \frac{F_{uy}}{F_u} = \frac{\text{Tegangan.ultimate real}}{\text{tegangan ultimate nominal}} \dots\dots\dots(2.1a)$$

## 2.2 Sistem Struktur Baja Tahan Gempa

Sebagian besar wilayah di Indonesia berada dalam zona rawan gempa. Untuk memastikan keselamatan para penghuni serta mengurangi dampak kerusakan yang dapat ditimbulkan oleh gempa bumi, diperlukan standar dan regulasi yang ketat dalam desain bangunan. Dengan demikian, setiap bangunan yang dirancang untuk tahan gempa harus memiliki stabilitas, kekakuan, dan kekuatan untuk mencegah keruntuhan.

Menurut sudut pandang teknik sipil, material yang digunakan dalam struktur bangunan harus memenuhi syarat tertentu agar mampu menahan gaya gempa. Namun, ketahanan sebuah bangunan terhadap gempa tidak cukup hanya dilihat dari materialnya saja. Faktor lain yang harus diperhatikan meliputi kontinuitas sambungan, kekakuan yang seragam, dan detail struktur dalam menilai ketahanan sistem secara keseluruhan..

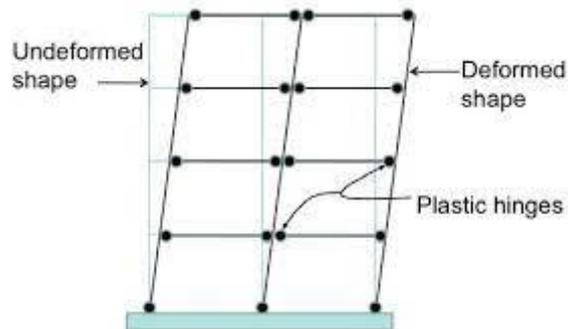
Pada bangunan tingkat tinggi (*highrise building*), struktur baja memiliki kesesuaian untuk digunakan. Hal tersebut dikarenakan struktur baja memiliki daktilitas yang tinggi dibanding material yang lain. Daktilitas memberikan kemampuan kepada struktur untuk berubah bentuk, sehingga dapat menyerap energi gempa dan mengurangi gaya seismic yang diterima oleh bangunan. Dengan adanya daktilitas, struktur dapat mengalami deformasi yang diperlukan untuk meredakan energi gempa dan meminimalisir dampak getaran. Berdasarkan pendapat Siswanto dan Salim (2018), baja memiliki kekuatan yang setara dalam menahan tegangan maupun kompresi, menjadikannya material yang sangat sesuai untuk bangunan yang harus menghadapi perubahan beban akibat gempa.

### 2.2.1 Sistem Portal kaku (*Rigid Frame*)

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

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) banyak diterapkan pada gedung bertingkat. Sistem ini memanfaatkan rangka pemikul momen khusus serta dinding struktural tertentu sebagai penahan gaya lateral. Menurut Karisoh (2018), komponen balok dan kolom dalam sistem ini dirancang untuk dapat menyerap

energi gempa dengan daktilitas yang optimal, sehingga sangat sesuai diterapkan di daerah dengan kondisi desain seismik D, E, dan F.



Gambar 2. 2 Desain seismik Special Moment Frame

#### b. *Intermediate Moment Frames*

Menurut Tajunna dkk., (2014), sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (*Intermediate Moment Frames* atau SRPMM) adalah jenis sistem rangka yang komponennya mampu menahan gaya melalui lentur, geser, dan aksial. Dengan tingkat daktilitas yang sedang, sistem ini dapat diterapkan di zona 1 hingga zona 4.

#### c. *Ordinary Moment Frames*

Menurut Irianti dan Karlinah (2021), sistem kerangka momen biasa memiliki daktilitas yang terbatas, sehingga hanya cocok digunakan untuk bangunan dengan kategori seismik B. Penggunaan sistem ini sebaiknya dibatasi pada struktur yang didominasi oleh beban gravitasi, seperti bangunan rendah dengan bentang panjang dan lebar..

### 2.3 Struktur Komposit

Penggunaan kombinasi balok baja dan pelat beton memiliki sejarah panjang dalam konstruksi. Pada awalnya, kedua material ini digunakan secara terpisah tanpa penghubung geser, yang menghasilkan struktur nonkomposit. Dalam kondisi nonkomposit ini, pelat beton mengalami defleksi yang signifikan ketika menerima beban yang semakin besar, karena tidak ada transfer gaya yang efektif antara kedua material.

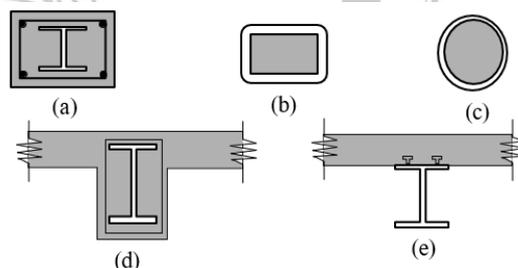
Perkembangan teknologi konstruksi telah menghasilkan teknik pengelasan yang canggih dan sistem sambungan geser yang efisien. Inovasi ini mendorong terbentuknya sambungan struktural yang lebih kuat antara balok baja dan pelat

beton. Hasil dari kemajuan tersebut adalah terciptanya anggota komposit, di mana baja dan beton bekerja sebagai satu kesatuan dalam menahan beban. Keunggulan sistem komposit ini sangat signifikan - struktur komposit mampu menahan beban 33-50% lebih besar dibandingkan dengan balok baja konvensional tanpa aksi komposit. Menurut Setiawan (2008), peningkatan kapasitas ini menunjukkan betapa efektifnya integrasi kedua material dalam menciptakan sistem struktural yang lebih kuat dan efisien.

### 2.3.1 Sistem Struktur Komposit

Konstruksi komposit merupakan suatu teknik bangunan yang menggabungkan dua atau lebih material dengan karakteristik yang berbeda, kemudian membentuk struktur bangunan yang lebih kuat dan efisien. Penggabungan ini bukan sekadar menumpuk material, melainkan menciptakan sistem yang mengoptimalkan sifat-sifat terbaik dari masing-masing material, menghasilkan struktur yang lebih unggul dibandingkan penggunaan material secara terpisah.

Dalam praktik konstruksi, struktur komposit umumnya diwujudkan dalam tiga bentuk utama. Pertama, kombinasi kolom atau balok baja yang dibungkus dengan beton. Kedua, kolom baja yang diisi dengan beton atau yang dikenal sebagai tiang pancang, memberikan stabilitas dan daya dukung yang lebih baik. Ketiga, sistem balok baja yang berfungsi sebagai penopang slab beton, menghasilkan lantai yang lebih kuat dan efisien dalam mendistribusikan beban.



**Gambar 2.3** Macam-macam Struktur Komposit

Sumber: Pujianto, *As'at. Struktur Komposit Dengan Metode LFRD, 2011*)

## 2.4 Metode LFRD

*Load Resistance Factor Design* atau LFRD merupakan konstruksi baja yang menggunakan sebuah metode desain struktural serta dikembangkan oleh AISC.

Metode ini memiliki kesamaan dengan metode ASD Strength, namun menawarkan pendekatan yang lebih sistematis dalam membandingkan pembebanan ( $Q$ ) dengan kapasitas ketahanan struktur ( $R_n$ ). Keadaan yang menggambarkan batasan kemampuan suatu struktur untuk berfungsi secara optimal disebut kondisi batas. Dalam proses desain, penting untuk menetapkan kriteria tertentu guna memastikan bahwa peluang terjadinya pelanggaran terhadap kondisi batas tersebut sangat kecil. Hal ini dapat dilakukan dengan memilih kombinasi factor ketahanan, gaya, dan nilai ketahanan yang tepat, sehingga kinerja struktur tetap berada dalam batas yang ditentukan oleh kriteria desain.

- a) Kondisi batas layan fokus pada fungsionalitas struktur selama masa pakainya. Kriteria ini memastikan bahwa perilaku struktur yang terjadi (seperti lendutan, retak, atau getaran) tidak melebihi batas yang diizinkan dalam desain, sehingga struktur tetap dapat berfungsi sebagaimana mestinya
- b) Kondisi batas ultimit sangat erat kaitannya dengan keamanan struktur dan potensi terjadinya kegagalan. Dalam kondisi ini, kekuatan nominal struktur harus lebih besar atau setara dengan kekuatan yang dibutuhkan, yang dihitung berdasarkan reaksi maksimum akibat berbagai beban, seperti gaya geser ( $V_u$ ), gaya aksial ( $P_u$ ) momen lentur ( $M_u$ ), dan gaya puntir ( $T_u$ ).

Dalam mendesain struktur baja menggunakan metode LRFD, perhatian utama terletak pada keseimbangan antara beban dan kekuatan serta daya tahan struktur. Beban yang diterapkan tidak boleh melebihi kapasitas kekuatan struktur agar tidak melanggar kondisi batas yang ditetapkan. Simbol  $\phi R_n$  menggambarkan ketahanan desain elemen struktur, sedangkan  $\gamma_i Q_i$  menggambarkan beban yang harus ditanggung oleh struktur. Oleh karena itu, untuk memastikan keselamatan bangunan, kapasitas beban harus lebih besar daripada beban yang diterima. Pernyataan ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \dots\dots\dots (2.2a)$$

Dimana:

$i$  = menunjukan berbagai kondisi

$\sum$  = Penjumlahan

$Y_i$  = faktor beban terkait beban  $Q_i$  yang ditinjau

$Q_i$  = pengaruh beban nominal

$R_n$  = kuat nominal, kekuatan elemen yang dihasilkan

$Y_i Q_i$  = kuat perlu

$\phi R_n$  = kuat rencana

$\phi$  = faktor tahanan (d disesuaikan dengan jenis struktur yang akan ditinjau)

Desain LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) pada dasarnya menghasilkan desain yang lebih optimal dengan mempertimbangkan interaksi antara kekuatan material dan pembebanan. Pada sisi kiri, kita dapat melihat representasi dari tahanan atau kekuatan suatu komponen atau sistem, sementara sisi kanan mencerminkan beban yang diharapkan. Dengan pendekatan ini, struktur yang dihasilkan menjadi lebih aman. Untuk mengukur kekuatan, nilai resistansi yang ditentukan ( $R_n$ ) dikalikan dengan faktor resistansi (yang juga dikenal sebagai diskon kekuatan)  $\phi$ , sehingga menghasilkan kekuatan desain. Dengan demikian, desain LRFD menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif dan aman dalam perancangan struktur.

#### 2.4.1 Ketentuan LRFD

Dalam desain konstruksi baja, yang mengacu pada SNI 1729-2020 mengenai spesifikasi baja untuk konstruksi, terdapat dua pendekatan yang perlu dipertimbangkan, yaitu beban desain dan faktor ketahanan (DFBK) atau kekuatan desain yang diizinkan (DKI). Sebuah struktur dianggap memenuhi persyaratan desain jika kekuatan yang dibutuhkan ( $R_u$ ) tidak melebihi kekuatan desain ( $\phi R_n$ ). Di sini,  $\phi$  melambangkan faktor resistensi yang nilainya dapat bervariasi, tergantung pada perilaku atau kinerja dari komponen tersebut. Selanjutnya, akan dibahas secara rinci mengenai konsep dasar dari ketentuan LRFD (*Load and Resistance Factor Design*):

$$R_u \leq \phi R_n \dots \dots \dots (2.2b)$$

Dengan:

$\phi$  = faktor tahanan sesuai jenis struktur yang di tinjau

$R_n$  = kuat nominal, kekuatan elemen yang dihasilkan

$R_u$  = Kuat Perlu, menggunakan kombinasi beban LRFD

$\phi R_n$  = kuat rencana

Tabel 2. 1 Faktor Tahanan

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

Sumber : Standar Nasional Indonesia 1729:2020

## 2.5 Gaya Geser Dasar Akibat Gempa

Gaya dasar akibat gempa dijadikan acuan untuk menentukan gaya gempa yang harus diperhitungkan oleh perancang, dan hal ini penting untuk analisis dalam mendesain serta mengevaluasi struktur. Sesuai dengan Standar Nasional Indonesia 1726-2019, nilai gaya lateral dasar seismik ( $V$ ) untuk arah tertentu perlu ditentukan dengan menggunakan persamaan yang tercantum dalam standar tersebut.

$$V = C_s W$$

Dengan:

$W$  = berat seismik efektif

$C_s$  = koefisien respons seismik

### 2.5.1 Koefisien Respon Seismik

Standar Nasional Indonesia SNI 1726-2019 menyebutkan  $C_s$  (koefisien respon seismic) dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T(\frac{R}{I_e})} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan :

$I_e$  = faktor keutamaan gempa

$R$  = koefisien modifikasi respons

$SDS$  = parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek

### 2.5.2 Distribusi Horizontal Gaya Gempa

$V_x$  (kN) atau gaya geser seismic dalam Standar Nasional Indonesia 1726-2019 ditentukan berdasarkan persamaan:

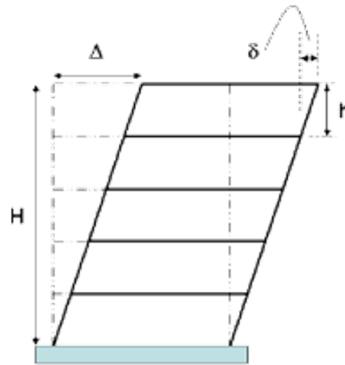
$$V_x \sum_{i=1}^n F_i \dots\dots\dots(2.5a)$$

### 2.5.3 Perancangan Stabilitas Struktur

Berikut parafrase dari teks tersebut: Dalam merencanakan stabilitas struktur, diperlukan pendekatan yang mengkombinasikan antara analisis untuk menentukan kuat perlu penampang dan proses desain strukturnya. Kombinasi ini penting untuk memastikan bahwa struktur yang direncanakan memiliki kekuatan yang memadai dalam menahan beban yang bekerja. Untuk memverifikasi hal tersebut, perlu dilakukan serangkaian pengecekan terhadap struktur yang direncanakan.

#### 2.5.3.1 Drift Ratio

Rasio simpangan atau *drift ratio* adalah parameter yang menggambarkan perbandingan antara simpangan puncak dan tinggi total sebuah bangunan. Tingkat keamanan suatu bangunan dapat dinilai melalui rasio simpangan tersebut; semakin kecil nilainya, semakin aman bangunan itu. Dalam praktiknya, batas rasio simpangan yang biasa diterapkan adalah 0,0025, yang juga dapat dinyatakan sebagai  $H/400$ .



**Gambar 2. 4** Gambar Drift Ratio

Saat menganalisis rasio simpangan, kita sering menemui fenomena yang dikenal sebagai "*soft storey*". Situasi ini terjadi ketika simpangan antar lantai lebih besar pada bagian bawah bangunan dibandingkan dengan lantai-lantai di atasnya. Sementara itu, dalam kondisi normal, nilai tertinggi untuk rasio simpangan seharusnya muncul di lantai teratas bangunan. Rasio drift dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Rasio Simpangan} = \frac{\Delta_{Top}}{H} \leq 0,0025 \dots\dots\dots(2.5b)$$

Dengan:

H = Tinggi bangunan (m)

$\Delta_{Top}$  = Displacement puncak bangunan (m)

### 2.5.3.2 Simpangan Antar Tingkat

Saat merancang gedung, perhitungan simpangan antar lantai dilakukan dengan mengukur selisih lendutan antara lantai teratas dan lantai di bawahnya. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia 1726:2019 Pasal 7. 12, terdapat batasan mengenai simpangan antar lantai yang tidak disarankan lebih dari nilai simpangan yang diizinkan ( $\Delta_a$ ), sesuai dengan ketentuan berikut:

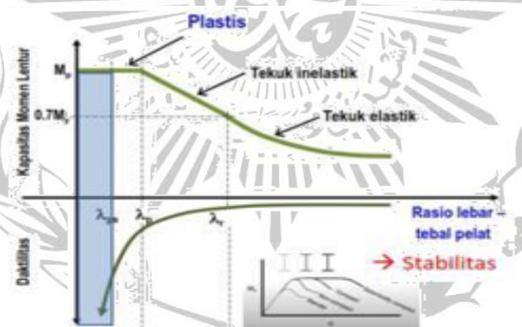
**Tabel 2. 2** Kategori Risiko

struktur	Kategori resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur dinding geser kantilever batu bata.	0,010h <sub>sx</sub>	0,010h <sub>sx</sub>	0,010h <sub>sx</sub>
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 <sub>sx</sub>	0,020h <sub>sx</sub>	0,015h <sub>sx</sub>
Semua struktur lainnya	0,020h <sub>sx</sub>	0,015h <sub>sx</sub>	0,010h <sub>sx</sub>
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007h <sub>sx</sub>	0,005h <sub>sx</sub>	0,007h <sub>sx</sub>

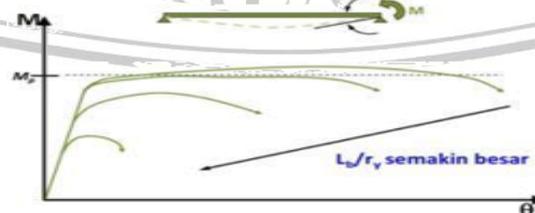
Sumber : Standar Nasional Indonesia 1726:2019

## 2.6 Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan suatu struktur untuk mengalami deformasi besar secara berulang-ulang dan bergantian selama terjadinya gempa bumi, bahkan ketika beban gempa yang diterima sudah melebihi batas awal. Yudi dkk., (2019) menjelaskan bahwa meskipun struktur tersebut berada dalam kondisi mendekati keruntuhan, bangunan masih dapat mempertahankan kekuatan dan kekakuannya



**Gambar 2. 5** Daktilitas pada penampang



**Gambar 2. 6** Daktilitas Pada Elemen

Sumber: SNI 7860:2020

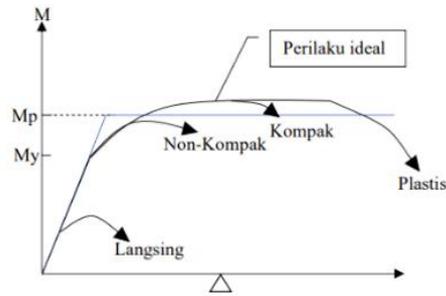
Ketika sebuah struktur mengalami deformasi, seperti perpanjangan, pemendekan, dan tekukan, faktor daktilitas menjadi parameter krusial dalam menentukan seberapa besar beban gempa yang dapat diserap oleh struktur tersebut. Untuk mencapai tingkat daktilitas yang diinginkan, penting untuk menerapkan konsep "kolom kuat - balok lemah." Dalam konsep ini, balok harus mengalami kelelahan terlebih dahulu sebelum kolom mengalami kerusakan. Sudarsana dkk., (2015) menjelaskan bahwa dengan cara ini, sendi plastis akan terbentuk hanya pada ujung balok dan kaki kolom.

Pada struktur rangka, dissipasi energi gempa dapat dioptimalkan melalui proses pelelehan sambungan plastis antara komponen kolom dan balok. Komponen-komponen ini diharapkan dapat memberikan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas yang diperlukan untuk menahan berbagai gaya yang bekerja, seperti gaya lentur, geser, dan aksial.

### **2.6.1 Stabilitas Penampang Baja**

Dalam mendesain struktur baja, terutama untuk komponen yang menerima beban lentur, sangat penting untuk memahami bagaimana mengklasifikasikan bagian-bagian profil baja. Klasifikasi ini didasarkan pada perbandingan antara lebar dan tebal ( $b/t$  atau  $\lambda$ ) dari setiap elemen profil, yang nantinya akan menentukan cara menghitung kapasitas lentur nominal ( $M_n$ ) dari penampang tersebut. Mengikuti standar SNI 1729:2020 yang diadopsi dari AISC 2016, elemen lentur dapat dibagi menjadi tiga kategori:

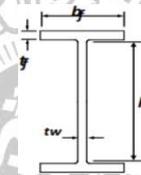
1. Penampang kompak
2. Penampang nonkompak
3. Penampang langsing.



Gambar 2. 7 Perilaku Penampang Baja

1. Penampang Nonkompak

Penampang nonkompak memiliki kondisi yang sedikit berbeda. Dalam kategori ini, setidaknya satu atau beberapa elemen tekan memiliki rasio lebar-ketebalan ( $\lambda$ ) yang berada di antara batas plastis ( $\lambda_p$ ) dan batas rasio tekuk ( $\lambda_r$ ). Kondisi ini mengindikasikan bahwa penampang mulai mengalami potensi tekuk lokal namun masih mampu menahan beban dengan kapasitas yang terbatas.



Gambar 2. 8 Penampang Baja

2. Penampang Kompak

Sebuah penampang dapat dianggap kompak jika memenuhi dua kriteria utama. Pertama, seluruh sayap dan badan struktur harus terhubung secara integral. Kedua, elemen kompresi harus memiliki rasio lebar terhadap ketebalan ( $\lambda$ ) yang tidak melebihi batas plastis ( $\lambda_p$ ). Dengan kata lain, penampang melintang tersebut mampu mencapai momen plastis penuh tanpa menyebabkan terjadinya tekuk lokal.

2.6.1.1 Daktilitas Tinggi penampang

Rasio lebar terhadap ketebalan  $\leq \lambda_{hdM}$

Bagian sayap

$$\frac{b}{t_f} = \frac{b_f}{2t_f} \leq \lambda_{hd} = 0,32 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Bagian Badan

Untuk  $Ca \leq 0,114$

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

Untuk  $Ca > 0,114$

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

Dengan:

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

### 2.6.1.2 Daktilitas Sedang

Rasio lebar terhadap ketebalan  $\leq \lambda_{mdm}$

Bagian sayap

$$\frac{b}{tf} = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda_{md} = 0,40 \sqrt{\frac{E}{RyFy}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Bagian Badan

Untuk  $Ca \leq 0,114$

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

Untuk  $Ca > 0,114$

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

Dimana :

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

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

$$\lambda \geq \lambda_r$$

Flens:

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

$$\lambda = \frac{h}{tw} \leq \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots(2.9b)$$

### 2.6.1.3 Penampang Kompak

$$M_n = M_p = Z \cdot f_y \dots\dots\dots (2.10a)$$

Yang menyatakan bahwa :

$M_n$  = Momen plastis (N.mm)

$F_y$  = Tegangan leleh baja (Mpa)

$$Z_x = b \cdot t_f (d - t_f) + \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (d - t_f)^2 \text{ untuk profil WF, mm}^3 \dots\dots\dots(2.10b)$$

$$Z_y = \frac{1}{2} \cdot b^2 \cdot t_f + \frac{1}{2} \cdot t_w^2 \cdot (d - t_f) \text{ untuk profil WF, mm}^3 \dots\dots\dots(2.10c)$$

$b$  = lebar pada sayap (mm)

$d$  = tinggi pada penampang (mm)

$t_f$  = tebal pada sayap (mm)

$t_w$  = tebal pada badan (mm)

### 2.6.1.4 Penampang Tak Kompak

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \dots\dots\dots(2.10d)$$

$$M_n = (f_y - f_r) \times S \dots\dots\dots(2.10e)$$

Dengan :

$M_r$  = momen batas tekuk (Nmm)

$f_r$  = tegangan pada sisa (Mpa)

$f_r = 70$  Mpa ntuk penampang dilas panas

$f_r = 115$  Mpa untuk penampang yang dilas

### 2.6.1.5 Penampang Langsing

$$M_n = M_r \left(\frac{y}{b}\right)^2 \dots\dots\dots(2.10f)$$

**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	
			$\lambda_{hdm}$	$\lambda_{mdm}$
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	$0,32\sqrt{E/F_y}$	$0,40\sqrt{E/F_y}$
	Sayap profil fondasi tiang H menurut Pasal D4	b/t	Tidak berlaku	$0,48\sqrt{E/F_y}$
	Badan profil T	d/t	$0,32\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0,40\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
Elemen Diperkaku	Dinding PSR persegi	b/t	$0,65\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0,76\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
	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		
Elemen diperkaku	1) Dinding PSR persegi	b/t	$0,65\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$1,18\sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$
	2) Sayap dan pelat samping profil I kotak, badan dan sayap profil kotak tersusun	h/t		

	<p>Jika digunakan pada balok, kolom atau perangkai, sebagai pelat badan yang mengalami lentur atau kombinasi aksial-lentur:</p> <p>1) Badan profil I gilas atau tersusun 2) Pelat samping profil I kotak 3) Badan profil kotak</p>	<p>h/tw  h/t h/t</p>	<p>Untuk <math>Ca \leq 0,114</math> <math>\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 2,57 \sqrt{\frac{E}{RyFy}} (1-1,04Ca)</math> Untuk <math>Ca \geq 0,114</math> <math>\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd 0,88 \sqrt{\frac{E}{RyFy}} (2,68 - Ca)</math> <math>\geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{Fy}}</math> Dimana : <math>Ca = \frac{Pu}{\phi cPy}</math> (LRFD)</p>	<p>Untuk <math>Ca \leq 0,114</math> <math>\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd = 3,96 \sqrt{\frac{E}{RyFy}} (1-3,04Ca)</math> Untuk <math>Ca \geq 0,114</math> <math>\frac{h}{tw} = \leq \lambda hd 1,29 \sqrt{\frac{E}{RyFy}} (2,68 - Ca)</math> <math>\geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{Fy}}</math> Dimana : <math>Ca = \frac{Pu}{\phi cPy}</math> (LRFD)</p>
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 $\lambda_r$ (langsing/nonlangsing)	
				$\lambda_p$	$\lambda_r$
Elemen kaku	1	Sayap profil I gilas panas, kanal dan sayap T	b/t	$0,38 \frac{E}{f_y}$	$1,00 \frac{E}{f_y}$
	2	Sayap profil I tersusu bentuk I simetris ganda dan tunggal	b/t	$0,38 \frac{E}{f_y}$	$0,95 \frac{E}{f_y}$
	3	Kaki siku tunggal	b/t	$0,54 \frac{E}{f_y}$	$0,91 \frac{E}{f_y}$
	4	Sayap semua profil I dan kanal yang mengalami lentur terhadap sumbu lemah	b/t	$0,38 \frac{E}{f_y}$	$1,00 \frac{E}{f_y}$
Elemen tidak kaku	5	Badan T	d/t	$0,84 \frac{E}{f_y}$	$1,52 \frac{E}{f_y}$
	6	Beban profil simetris ganda dan kanal	h/tw	$3,76 \frac{E}{f_y}$	$5,70 \frac{E}{f_y}$
	7	Badan profil simetris tunggal	hc/tw	$\frac{\frac{hc}{hp} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_p}{M_y} - 0,09\right)}$ $< \lambda_r$	$5,70 \frac{E}{f_y}$
	8	Sayap PSR Persegi Panjang	b/t	$1,12 \frac{E}{f_y}$	$1,40 \frac{E}{f_y}$

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

MALANG

**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 $\lambda r$ (lansing/nonlansing)	Batas rasio lebar terhadap tebal	
					$\lambda h d$	$\lambda m d$
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	$0,75 \frac{E}{fy}$	$\frac{0,32 E}{Ry \cdot fy}$	$0,4 \frac{E}{Ry \cdot fy}$

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

### 2.6.2 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

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

$C_{vx}$  = faktor distribusi vertical

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

Di dalam konteks ini,  $W_i$  dan  $W_x$  merujuk pada fraksi massa seismik efektif struktur ( $W$ ) yang diterapkan pada bidang  $i$  atau  $x$ . Sementara itu,  $h_i$  dan  $h_x$  menunjukkan tinggi dari dasar hingga ke bidang  $i$  atau  $x$  (dalam satuan meter). Ada juga parameter  $k$ , yang merupakan eksponen yang berkaitan dengan periode struktur, dengan nilai yang ditentukan sebagai berikut: untuk struktur yang memiliki periode  $T \leq 0,5$  detik,  $k$  bernilai 1; untuk struktur dengan  $T \geq 2,5$  detik,  $k$  bernilai 2; dan untuk struktur dengan periode berada di antara 0,5 hingga 2,5 detik, nilai  $k$  akan disesuaikan berdasarkan kebutuhan.

### 2.6.3 Perencanaan struktur balok komposit

Struktur balok komposit merupakan inovasi teknik sipil yang menggabungkan dua material berbeda - beton dan baja - untuk menciptakan sistem struktural yang lebih unggul. Konsep dasar dari struktur ini adalah memanfaatkan karakteristik mekanis unik dari masing-masing material: beton yang memiliki kekuatan tekan superior dan baja yang memiliki ketahanan tarik yang *excellent*. Ketika beton dan baja bekerja secara terintegrasi, mereka menghasilkan performa struktural yang jauh lebih optimal dibandingkan dengan penggunaan material tunggal. Keunggulan struktur komposit beton-baja mencakup beberapa aspek kritis dalam perancangan konstruksi:

1. Peningkatan Kapasitas Struktural
  - a. Mampu meningkatkan kapasitas momen balok secara signifikan
  - b. Meningkatkan kemampuan balok dalam memikul beban
  - c. Mengoptimalkan distribusi tegangan antar material
2. Proteksi dan Durabilitas
  - a. Memberikan perlindungan anti-korosi pada struktur baja melalui selimut beton
  - b. Meningkatkan umur layanan struktur
  - c. Menghasilkan sistem struktural dengan durabilitas lebih tinggi dibandingkan balok homogen

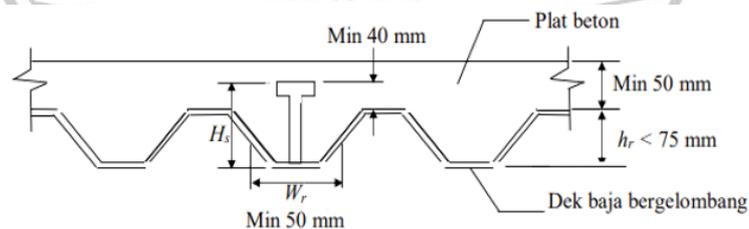
Kunci keberhasilan sistem komposit terletak pada elemen penghubung geser (shear stud), yang memainkan peran kritis dalam mengintegrasikan beton dan baja. Menurut Cahyati (2016), penghubung geser ini bertindak sebagai pengikat

struktural yang menjamin transfer beban dan deformasi secara efektif antara kedua material, menciptakan kesatuan struktural yang kokoh dan efisien .

### 2.6.3.1 Balok Komposit Dengan Dek Baja Gelombang

Dalam konstruksi struktur komposit, penggunaan dek baja gelombang diatur secara ketat oleh standar SNI 1729:2020 untuk memastikan kinerja struktural optimal. Persyaratan ini mencakup beberapa aspek kritis yang dirancang untuk menjamin integritas dan efektivitas sistem komposit antara beton dan baja:

- a. Dimensi geometris dek baja dibatasi dengan ketat, di mana tinggi rusuk tidak boleh melebihi 3 inci (75 mm) dan lebar rata-rata rusuk minimal 2 inci (50 mm).
- b. Sistem pengangkatan menjadi komponen kunci dalam desain ini, mensyaratkan penggunaan angkur baja stad berkepala yang dilas dengan ketentuan spesifik. Angkur tersebut harus menonjol minimal 1½ inci di atas dek baja dan tertutup selimut beton paling sedikit 1½ inci, menciptakan ikatan struktural yang kuat.
- c. Ketebalan minimum untuk bantalan beton ditetapkan sebanyak 2 inci, disertai dengan penahan yang diperlukan untuk setiap komponen penahan beban dengan jarak maksimum 18 inci. Jenis penahan yang digunakan dapat beragam, mulai dari angkur baja berkap kepala, tiang las busur, hingga perangkat khusus sesuai dengan dokumen kontrak. Inti dari persyaratan ini adalah untuk membangun sebuah sistem komposit yang terintegrasi dengan sempurna, guna memastikan transfer beban yang efisien dan mencegah terjadinya selip antara material beton dan baja.



**Gambar 2. 9** Penampang Melintang Dek Baja Gelombang  
Sumber: SNI 1729-2020

Saat merancang pelat atap yang memanfaatkan *floor deck*, tulangan positif akan digantikan oleh pelat lantai itu sendiri. Nilai modulus penampang pelat lantai diperoleh dari persamaan:

$$M_n = A_s \cdot F_y \left( d_{\text{eff}} - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.11a)$$

Dengan

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b} \dots\dots\dots (2.11b)$$

Dalam merencanakan tulangan untuk lapisan atas, penting untuk terlebih dahulu menentukan rasio tulangan maksimum dan minimum. Nilai rasio tulangan minimum ditentukan dengan mengambil angka terbesar dari dua persamaan yang ada.

$$\rho_b = 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (2.12a)$$

$$\rho_{\text{maks}} = 0,75 \times \rho_b \dots\dots\dots (2.12b)$$

atau

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1,4}{f_y} \dots\dots\dots (2.12c)$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} \dots\dots\dots (2.12d)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c'} \dots\dots\dots (2.12e)$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.12f)$$

$$A_s \text{ perlu} = \rho \times b \times d \dots\dots\dots (2.12g)$$

**Tabel 2. 3** Luas Penampang Tulangan Kawat Baja Wire Mesh

Diameter Kawat D (mm)	Luas Kawat D (cm <sup>2</sup> )	Jumlah Luas Penampang Kawat (cm <sup>2</sup> /m <sup>1</sup> ) 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,  $r_s$  yang besarnya ditetapkan sebagai berikut:

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

Komponen Struktur	Tinggi minimum, h			
	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 terpenuhi				
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. 4** 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 elemen-elemen nonstruktural	Mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu jumlah dari
		Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar	lendutan jangka panjang akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup

Sumber : Standar Nasional Indonesia 2847-2019

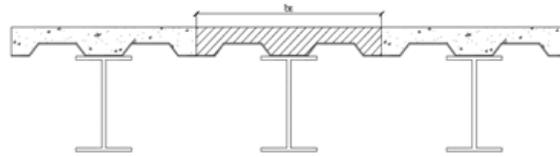
### 2.6.3.2 Lebar Efektif Balok Baja Komposit

Dalam desain struktur komposit, konsep lebar efektif merupakan pendekatan analitis yang sangat penting untuk memahami dan memperhitungkan distribusi tegangan yang kompleks dan tidak seragam. Metode ini memungkinkan perancang struktur untuk mendapatkan representasi yang lebih akurat tentang kemampuan sebenarnya dari suatu komponen struktural, terutama ketika elemen-elemen struktur mengalami beban yang tidak terdistribusi secara merata. Lebar efektif dari komponen komposit dapat ditentukan dengan persamaan

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

$$b_E \leq \frac{1}{8} \text{ jarak ke tepi slab (pelat)}$$

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



**Gambar 2. 10** Lebar Efektif Balok Komposit

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

**2.6.3.3 Tegangan pada Balok Komposit**

Untuk struktur komposit yang terdiri dari baja dan beton, perhitungan tegangan memerlukan pendekatan khusus yang mempertimbangkan sifat mekanik yang berbeda dari kedua material tersebut. Salah satu langkah penting dalam proses ini adalah menentukan pusat gravitasi komponen, yang memerlukan transformasi baik secara geometris maupun mekanis.

$$\text{Luas Transformasi} = \frac{bE}{n} \dots\dots\dots(2.13)$$

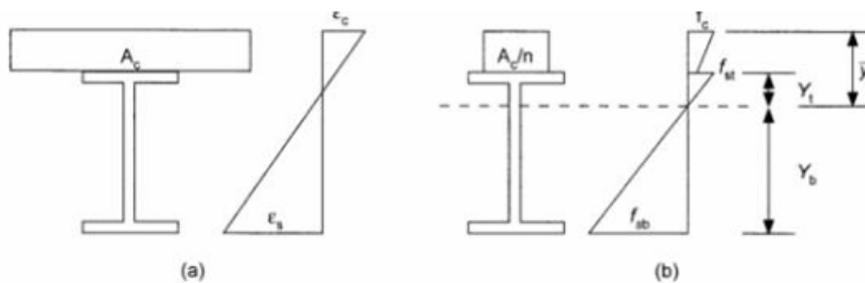
Dimana :

$$n \quad : \text{rasio modular} = \frac{ES}{EC} \dots\dots\dots(2.13a)$$

$f'_c$  : kuat tekan rencana pada usia 28 hari (Mpa)

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

Es : modulus elastis baja (200000 Mpa)



**Gambar 2. 11** Diagram Regangan Tegangan Balok

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Setelah menetapkan luas transformasi, langkah selanjutnya adalah menghitung momen inersia penampang untuk mengetahui total tegangan yang ada. Total tegangan pada penampang dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut::

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

$$F_{sb} : \frac{M \times y_b}{I} \dots\dots\dots (2.13b)$$

$$F_c : \frac{M \times y^-}{n \times I} \dots\dots\dots (2.13b)$$

Dimana :

I : momen inersia penampang

M : momen yang terjadi

$y^-$ : jarak titik berat penampang dengan tepi atas penampang beton

$y_t$  : jarak titik berat penampang dengan tepi atas penampang baja

$y_b$  : jarak titik berat penampang dengan tepi bawah penampang baja

### 2.6.3.4 Kekuatan Lentur Nominal

#### Kekuatan Lentur Positif

Menurut SNI 1729 - 2020, ditetapkan bahwa kekuatan lentur desain,  $\phi_b \cdot M_n$ , dari komponen komposit (untuk momen positif) serta kekuatan lentur positif yang diizinkan,  $M_n$ , ditentukan berdasarkan kondisi titik leleh sebagai berikut:

a. Apabila  $h/t_w \leq 3,76 \sqrt{E/F_y}$  .....(2.14a)

$M_n$  harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis).  $\phi_b = 0.90$

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

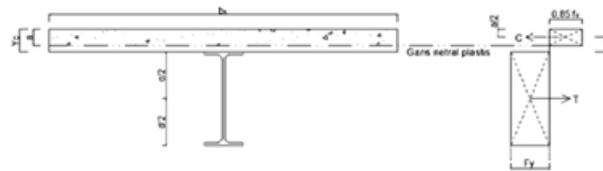
Untuk menghitung momen plastis balok komposit dicari posisi sumbu netral plastis, yang tergantung proporsi C dan T. Dengan nilai resultan gaya tekan dan tarik sebagai berikut:

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_c \dots\dots\dots (2.15)$$

$$T = F_y \cdot A_s \dots\dots\dots (2.16)$$

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

- **Jika  $T \leq C$  sumbu netral plastis didalam pelat beton**



**Gambar 2. 12** Distribusi Tegangan Plastis Kondisi  
 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.

$$a = \frac{As \cdot fy}{0,85 \cdot f'c \cdot be} \dots\dots\dots (2.17a)$$

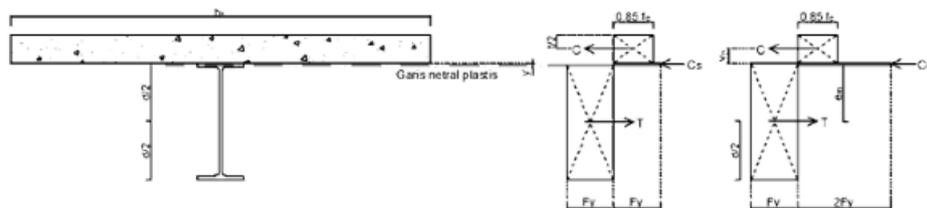
Asumsi benar jika  $a < tc$  jika pakai dek baja, atau  $a < t$  pelat beton solid

$$Yc = hr + tc \dots\dots\dots (2.17b)$$

$$Y2 = Yc - 1/2 a \dots\dots\dots (2.17c)$$

$$Mn = Mp = Fy \cdot AS \cdot (Y2 + 1/2 d) \dots\dots\dots (2.17d)$$

**Jika  $T > C$  sumbu netral plastis di baja (pelat sayap)**



**Gambar 2. 13** 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.

$$T = Fy \cdot AS \dots\dots\dots (2.18a)$$

$$C = 0,85 \cdot fc' \cdot b_E \cdot tc \dots\dots\dots (2.18b)$$

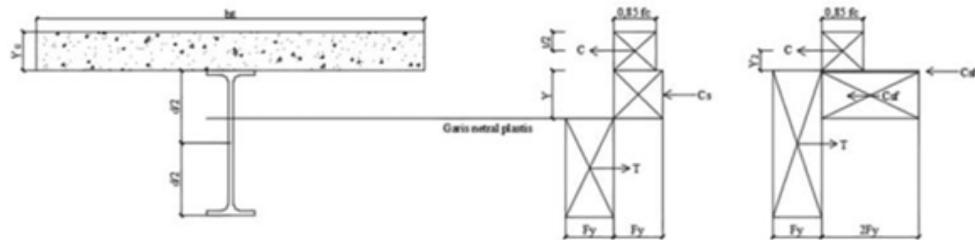
$$Y = \frac{T-C}{bf \cdot fy} \leq tf \dots\dots\dots (2.18c)$$

$$C_s = \frac{A_s \cdot F_y - c}{2} \dots\dots\dots(2.18d)$$

$$C_{sm} = 2 F_y \cdot y \dots\dots\dots(2.18e)$$

$$M_n = M_p = C_s (Y_2 + 1/2 d) + C_{sm} (d - y) \frac{1}{2} \dots\dots\dots(2.18f)$$

- **Jika T > C sumbu netral plastis di baja (pelat badan)**



**Gambar 2. 14** Distribusi Tegangan Plastis Kondisi c

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

**Gambar 2. 10** Distribusi Tegangan Plastis Kondisi c

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Jika  $y > t_f$  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  $T - C - C_{sf} > 0$ . Adapun nilai-nilainya dihitung sebagai berikut:

$$T = F_y \cdot A_s \dots\dots\dots(2.19a)$$

$$C = 0,85 \cdot f_c' \cdot bE \cdot t_c \dots\dots\dots(2.19b)$$

$$C_{sf} = b_f \cdot t_f \cdot 2F_y \dots\dots\dots(2.19c)$$

$$Y = \frac{T - C - C_{sf}}{t_w \cdot f_y} \leq t_f \dots\dots\dots(2.19d)$$

$$C_{sw} = 2 F_y \cdot y \cdot t_w \dots\dots\dots(2.19e)$$

$$y_f = 1/2 \cdot (d - t_f) \dots\dots\dots(2.19f)$$

$$y_w = 1/2 \cdot (d + y) - t_f \dots\dots\dots(2.19g)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + 1/2 d) + C_{sf} \cdot y_f + C_{sw} \cdot y_w \dots\dots\dots(2.19h)$$

**Kuat Lentur Negatif**

Menurut Pasal I3. 2a SNI 1729:2020, terdapat persyaratan yang kompleks untuk menentukan kekuatan lentur negatif pada konstruksi komposit, yang memerlukan beberapa kondisi kritis dalam proses perhitungan distribusi tegangan. Kekuatan lentur dapat ditentukan melalui dua pendekatan utama: pertama,

berdasarkan penampang baja saja seperti yang dijelaskan dalam Bab F; kedua, melalui distribusi tegangan plastis pada penampang komposit. Dalam pendekatan distribusi tegangan plastis, terdapat beberapa faktor reduksi yang perlu diperhatikan:  $\phi_b = 0,90$  untuk desain terbatas (DFBT) dan  $\Omega_b = 1,67$  untuk kekuatan desain yang diizinkan (DKI). Selain itu, terdapat tiga batasan utama yang harus diperhatikan:

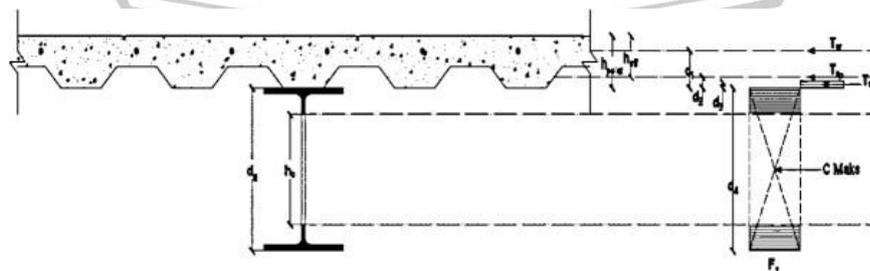
- a. Balok baja harus merupakan penampang kompak dan mendapatkan breising yang memadai
- b. Keberadaan angkur kanal baja yang menyambungkan pelat balok
- c. Perhitungan akurat tulangan pelat yang sejajar dengan balok baja

Di area momen positif, kontribusi penguatannya tergolong minimal. Namun, keadaan menjadi sangat berbeda di daerah momen negatif. Pada saat itu, pelat beton berada dalam kondisi tegang. Mengingat beton memiliki kemampuan terbatas dalam menahan gaya tarik, pelat ini dapat diabaikan. Agar kontribusi tulangan pada pelat beton dapat diakui, gaya yang dihasilkan harus dapat ditransfer melalui penghubung geser. Hal ini menggarisbawahi pentingnya sistem penghubung yang efektif dalam struktur komposit untuk mentransfer beban dan menjamin kinerja struktural yang optimal. Metode ini menunjukkan kompleksitas desain struktur komposit, di mana setiap komponen memiliki peran dan batasan yang spesifik dalam mendistribusikan tegangan dan memikul beban. Kuat nominal yang timbul pada tulangan dapat dihitung sebesar:

$$T_{sr} = A_{sr} \times F_{ysr} \dots\dots\dots(2.20a)$$

Gaya tekan maksimum dari profil baja adalah:

$$C_{maks} = A_s \times F_y \dots\dots\dots(2.20b)$$



**Gambar 2.11** Distribusi Tegangan Akibat Momen

Sumber : Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD

Karena  $C_{maks} > T_{sr}$ , maka sumbu netral plastis akan jatuh pada profil baja dan kesetimbangan gaya dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_{sr} + T_s = C_{maks} - T_s \dots\dots\dots(2.20c)$$

$$2T_s = C_{maks} - T_{sr} \dots\dots\dots(2.20d)$$

$$T_s = \frac{C_{maks} - T_{sr}}{2} \dots\dots\dots(2.20e)$$

Gaya pada badan,  $T_w = T_s - T_f$

Gaya pada sayap,  $T_f = b_f \cdot t_f \cdot F_y$

Jarak sumbu netral dari tepi bawah flens adalah:

$$a_w = \frac{T_w}{F_y \cdot T_w} \dots\dots\dots(2.20f)$$

Menentukan jarak gaya yang bekerja dari *centroid*:

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

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

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

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

$$M_n = T_{sr} \times (d1 + d4) + T_{sp} \times (d2 \times d4) + T_s (d4 - d3) \dots\dots\dots(2.20g)$$

**Kekuatan geser Nominal**



MALANG

Dalam Standar Nasional Indonesia 1729:2020 Pasal G2, perhitungan kuat geser nominal dapat dijelaskan melalui persamaan berikut.

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

$$Vn = 0,6 Fy \times Aw \times Cv1 \dots\dots\dots(2.20i)$$

Keterangan :

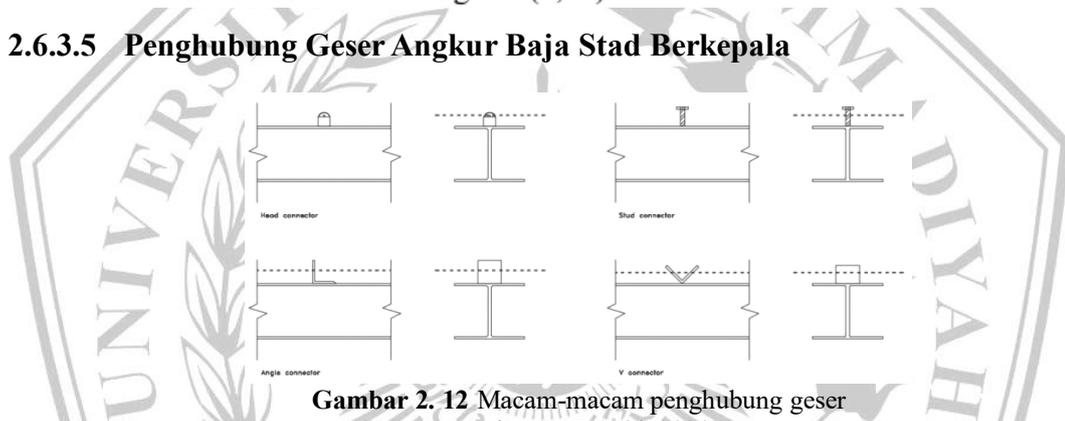
$$Cv1 = 1,0$$

$Vn$  = kuat geser nominal (N)

$Aw$  = Luas badan (mm<sup>2</sup>)

$\phi_v$  = faktor tahanan untuk geser (0,90)

#### 2.6.3.5 Penghubung Geser Angkur Baja Stad Berkepala



**Gambar 2. 12** Macam-macam penghubung geser  
Sumber: SNI 1729-2020

Penggunaan balok komposit dapat menyebabkan terjadinya gaya geser pada pelat beton dan balok baja. Untuk memastikan bahwa penampang komposit dapat berfungsi secara optimal dan dapat menahan gaya geser horizontal yang timbul, penting untuk memasang penghubung geser pada balok komposit. Penghubung geser yang biasa dipakai adalah tipe baut dan kanal.

Kekuatan geser nominal dari penghubung geser baja yang tertanam pada pelat beton padat atau pelat komposit dengan geladak perlu ditentukan berdasarkan ketentuan berikut:

$$Q_n = 0,5 A_{sa} \cdot \sqrt{F_c' E_c} \leq R_g \cdot R_p \cdot A_{sa} \cdot F_u \dots\dots\dots(2.21a)$$

Keterangan :

Asa : luas penampang dari angkur steel headed stud (mm<sup>2</sup>)

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

EC : modulus elastisitas beton  $W_c^{1.5} \sqrt{F_c'}$  Ksi ( $0,043 W_c^{1.5} \sqrt{F_c'}$ )

**Tabel 2. 5** Nilai Rg dan Rp

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

Sumber : SNI 1729-2020

Keterangan :

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

hr = tinggi rusuk nominal, in (mm)

[a] = untuk angkur steel headed stud tunggal

Wr = Lebar rata – rata rusuk (mm)

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

$$Q_n = 0,3 (t_f + 0,5t_w) \cdot I_a \cdot \sqrt{F_c' E_c} \dots\dots\dots(2.21b)$$

Dengan:

la = panjang angkur kanal, in. (mm)

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

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

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

$$V' = F_y \times A_s \dots \dots \dots (2.22a)$$

$$N = V' Q_n \dots \dots \dots (2.22b)$$

$Q_n$  = kuat geser nominal satu buah angkur konektor

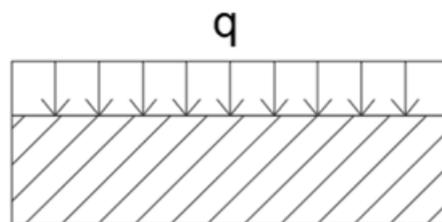
$V'$  = gaya geser horizontal

$N$  = jumlah angkur konektor yang dibutuhkan

### 2.6.3.6 Lendutan

Lendutan ditinjau akibat pengaruh beban mati dan beban hidup

#### a. Akibat Beban Merata



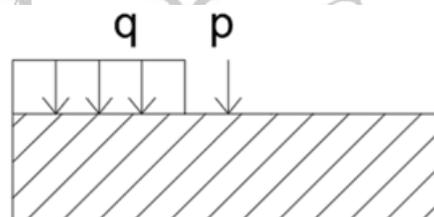
**Gambar 2. 13** Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

Lendutan akibat pengaruh beban merata

$$\Delta_{\max} = \frac{(DL) - I^4}{384.EI} \dots \dots \dots (2.23a)$$

$$\Delta_x = \frac{(DL) - I^4}{24.EI} (I-x)^2 \dots \dots \dots (2.23b)$$

#### b. Akibat beban merata dan beban terpusat ditengah



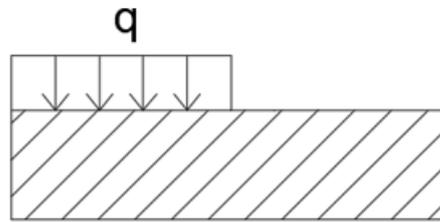
**Gambar 2. 14** Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata dan Terpusat

Lendutan akibat pengaruh beban merata dan beban terpusat

$$\Delta_{\max} = \frac{PI^3}{192.EI} \dots \dots \dots (2.23c)$$

$$\Delta_x \left(x < \frac{L}{2}\right) = \frac{Px^3}{48.EI} (3I.4x) \dots \dots \dots (2.23d)$$

- c. Akibat beban merata diujung balok kantilever



Gambar 2. 15 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

$$\Delta_{\max} = \frac{WI^4}{8.EI} \dots\dots\dots(2.23e)$$

$$\Delta x = \frac{W}{24.EI} (x^4 - 4I^3x + 3L^3) \dots\dots\dots(2.23f)$$

- d. Akibat beban terpusat diujung balok kantilever



Gambar 2. 16 Beban Terpusat di Ujung Balok Kantilever

$$\Delta_{\max} = \frac{pI^3}{3EI} \dots\dots\dots(2.23g)$$

$$\Delta x = \frac{p}{6EI} (2I^3 - 3I^3x + Tx^3) \dots\dots\dots(2.23h)$$

### 2.6.3.7 Perencanaan Batang Tarik

Baja memiliki keunikan sebagai material struktural karena mampu menahan gaya tarik dan tekan secara seimbang. Kualitas tinggi material ini memungkinkan struktur dirancang dengan dimensi langsing dan ringan. Dalam praktik teknik, penggunaan baja untuk elemen struktur yang mengalami gaya tarik terbukti sangat efektif. Anggota tegangan baja biasanya ditemukan pada berbagai struktur, seperti jembatan, rangka atap, menara transmisi, serta penahan angin. Anggota tegangan ini dapat terdiri dari satu profil tunggal atau serangkaian profil yang dihubungkan satu sama lain. Pilihan desain ini tergantung kebutuhan spesifik konstruksi dan beban yang akan ditanggung. Kemampuan baja menahan gaya tarik dengan baik menjadikannya material pilihan para insinyur. Struktur baja memungkinkan perancangan konstruksi yang kuat, ringan, dan ekonomis di berbagai bidang teknik.

#### a. Batas Kelangsingan

Secara teoritis, kelangsingan biasanya hanya diterapkan pada elemen kompresi untuk mencegah terjadinya tekuk. Batang tarik, di sisi lain, tidak mengalami tekuk dalam teori, sehingga kelangsingan batang tarik tidak terikat pada batas tertentu. Namun, SNI 1729-2020 merekomendasikan agar rasio panjang terhadap diameter ( $L/r$ ) tidak melebihi 300. Rekomendasi ini berlandaskan pada pengalaman praktis yang berkaitan dengan efisiensi ekonomi, kemudahan dalam produksi, serta minimnya risiko kerusakan selama proses konstruksi. Selain itu, perlu dicatat bahwa elemen yang sangat ramping cenderung berisiko mengalami goyangan atau getaran, yang tentunya bisa mengganggu kenyamanan penghuninya.

#### **b. Kekuatan Tarik**

Kekuatan tarik dari desain  $\phi_t P_n$ , di mana  $\phi_t$  berfungsi sebagai faktor ketahanan tarik dan  $P_n$  sebagai kekuatan impak nominal, merupakan nilai terendah yang dihasilkan dari dua pemeriksaan batas keruntuhan. Pemeriksaan ini dilakukan pada penampang utuh dan penampang berlubang (sambungan). Kekuatan tarik penampang utuh hingga titik runtuh sangat penting untuk diperhatikan.

- a. Untuk leleh Tarik pada penampang bruto :

$$P_n = F_y A_g \dots\dots\dots(2.24a)$$

$$\phi_t = 0,9 \text{ terhadap keruntuhan leleh}$$

- b. Untuk Keruntuhan Tarik pada penampang neto:

$$P_n = F_u A_e \dots\dots\dots(2.24b)$$

$$\phi_t = 0,75 \text{ terhadap keruntuhan fraktur}$$

Dengan:

$$A_e = \text{luas neto efektif, mm}^2$$

$$A_g = \text{luas penampang bruto, mm}^2$$

Kekuatan tarik yang tinggi dari penampang berongga pada titik sambungan memanfaatkan perilaku pengerasan regangan, yakni pengintensifan tegangan, yang terjadi di bawah kondisi regangan inelastis. Hal ini dipicu oleh puncak tegangan yang muncul di sekitar lubang.

$$P_n = F_u A_e = F_u A_n \cdot U \dots\dots\dots(2.24b)$$

dimana:

$U$  = faktor *shear lag*

$\phi_t = 0,75$  terhadap keruntuhan fraktur

$A_e$  = luas penampang efektif

$A_n$  = luas penampang bersih (*netto*)

Nilai  $F_y$  dan  $F_u$  ditentukan oleh kualitas material, khususnya oleh kekuatan luluh dan kekuatan tarik minimum. Keruntuhan leleh memiliki tingkat daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan keruntuhan biasa, sehingga faktor kekuatan tarik ( $\phi_t$ ) untuk keduanya pun berbeda. Sebagai hasilnya, faktor keamanan yang diterapkan pada keruntuhan pastinya lebih tinggi.

### 2.6.3.8 Perencanaan Batang Tekan

Material baja memiliki mutu tinggi sehingga menghasilkan batang tegangan yang sangat ramping. Secara teoritis, konsep kelangsingan umumnya hanya diterapkan pada elemen kompresi untuk mencegah terjadinya tekukan. Berbeda dengan elemen tekan, batang tarik secara matematis tidak rentan terhadap tekuk. Meskipun demikian, SNI 1729-2020 memberikan batasan praktis dengan menyarankan rasio panjang terhadap jari-jari kelembaman ( $L/r$ ) tidak melebihi 300. Rekomendasi ini didasarkan pada pertimbangan praktis, mencakup aspek ekonomis, kemudahan fabrikasi, dan meminimalkan risiko kerusakan selama konstruksi. Alasan lain pembatasan kelangsingan adalah mencegah perilaku struktur yang tidak diinginkan. Elemen struktur yang terlalu langsing cenderung mengalami getaran dan goyang, yang dapat mengganggu kenyamanan pengguna dan berpotensi menimbulkan kerusakan struktural jangka panjang.

#### a. Parameter Batang Tekan

Parameter mutu material, yaitu tegangan leleh ( $F_y$ ) dan tegangan ultimate ( $F_u$ ), memiliki peran berbeda dalam menentukan kekuatan struktural. Pada batang tarik, kedua parameter tersebut sama-sama penting dalam menghitung kekuatan. Sementara pada batang tekan, hanya tegangan leleh ( $F_y$ ) yang signifikan, sedangkan tegangan ultimate ( $F_u$ ) praktis tidak pernah tercapai.

Selain karakteristik material, batang tekan juga sangat dipengaruhi oleh parameter geometri. Parameter geometri mencakup beberapa aspek kritis yang menentukan perilaku struktural, yaitu:

- a. Luas penampang ( $A$ ), yang mempengaruhi kemampuan mendistribusikan beban
- b. Momen inersia minimum ( $I_{min}$ ), yang menggambarkan kekakuan lentur penampang
- c. Panjang batang dan kondisi tumpuan, yang diwakili oleh panjang efektif ( $KL$ )

Setiap parameter ini memainkan peran penting dalam menentukan kinerja dan kapasitas batang tekan, membuat desain struktural menjadi proses yang kompleks dan membutuhkan pertimbangan menyeluruh. Tekuk dibedakan menjadi 2:

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

#### **b. Kuat Tekan Nominal**

Tekuk global merupakan fenomena struktural yang kompleks, ditentukan oleh karakteristik kelangsingan dan geometri elemen penampang. Dalam mekanika struktur, dikenal tiga jenis perilaku tekuk utama:

- a. Tekuk Lentur: Deformasi yang terjadi akibat pembebanan pada arah tegak lurus sumbu batang
- b. Tekuk Torsi: Rotasi atau pilin yang dialami batang struktur
- c. Tekuk Lentur-Torsi: Kombinasi antara deformasi lentur dan torsi

Klasifikasi penampang sangatlah penting dalam menentukan potensi terjadinya tekuk. Penampang yang tidak ramping cenderung lebih stabil dan memiliki risiko tekuk lokal yang lebih rendah. Di sisi lain, penampang yang ramping memiliki risiko tinggi untuk mengalami tekuk lokal sebelum mencapai batas kekuatan luluh. Tekuk dapat terjadi dalam kondisi elastis, sebelum material mencapai tegangan leleh, desain yang efisien memerlukan pemilihan penampang yang tidak ramping. Pendekatan ini memastikan integritas struktural dan mengoptimalkan kinerja material.

#### **c. Tekuk Lentur**

Tekuk lentur merupakan fenomena deformasi global pada penampang tidak langsing, yang terjadi ketika batang tekan mengalami pembebanan aksial. Konsep tekuk ini pertama kali dirumuskan oleh Leonhard Euler, dan rumus yang

dikembangkannya masih menjadi acuan utama dalam menentukan kekuatan nominal batang tekan ( $P_n$ ). Untuk menyesuaikan dengan pendekatan perancangan batang tarik, perhitungan dilakukan dengan mempertahankan luas penampang utuh atau gross ( $A_g$ ) sebagai nilai konstan. Variabel utama dalam perhitungan adalah tegangan kritis ( $F_{cr}$ ), yang akan menentukan kapasitas batang tekan. Pendekatan ini memungkinkan perancang struktur untuk memperkirakan perilaku batang tekan dengan mempertimbangkan karakteristik geometri dan material secara komprehensif.

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

Tegangan kritis,  $F_{cr}$  dihitung berdasarkan syarat berikut, jika :

$$\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \text{ tekuk } \textit{inelastis}, \text{ maka :}$$

$$F_{cr} = (0,658 \frac{F_y}{F_e}) \cdot F_y \dots\dots\dots(2.25b)$$

$$\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25 \text{ tekuk } \textit{elastis}, \text{ maka :}$$

$$F_{cr} = 0,877 \cdot F_e \dots\dots\dots(2.25c)$$

Dengan

$F_e$  = tegangan tekuk elastis (MPa)

$P_n$  = Kuat tekan nominal pada kondisi tekuk lentur (N)

$A_g$  = luas penampang melintang bruto komponen struktur, in.2 (mm<sup>2</sup>)

$\phi_c$  = Faktor reduksi kuat tekan (0,90)

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

dengan  $F_e$  = tegangan tekuk Euler (elastis), yaitu:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(\frac{L_c}{r})^2} \dots\dots\dots(2.25d)$$

Dimana,

$r$  = radius girasi, in. (mm)

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

#### d. Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi

Selain tekuk, puntir (yang melibatkan tekuk dan torsi) atau kombinasi keduanya, dikenal sebagai tekuk tekuk-torsi, juga merupakan bagian dari fenomena tekuk. Hal ini umumnya terjadi pada penampang yang memiliki kekakuan torsi relatif rendah, atau ketika pusat geser dan pusat gravitasi tidak berimpit. Kuat tekan nominal dari penampang kolom yang tidak ramping terhadap tekuk puntir dan tekuk torsi lateral dapat dijelaskan sebagai berikut.

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

Tegangan Kritis,  $F_{cr}$  dihitung berdasarkan syarat berikut, jika:

Penampang siku ganda atau tee

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

Untuk penampang yang lain,  $F_{cr}$  tetap dengan rumus tekuk lentur, tetapi tegangan tekuk elastis  $F_e$  dihitung dengan memasukkan pengaruh kekakuan torsi batangnya sebagai berikut:

a. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

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

b. Profil dengan sumbu simetri tunggal, maka:

$$F_e \left( \frac{\pi^2 ECW}{(K_2 L)^2} + GJ \right) + \frac{1}{I_x + I_y} \dots\dots\dots(2.26d)$$

Dimana,

$I_x, I_y$  = momen inersia terhadap sumbu utama x dan y, in.4 ( $mm^4$ )

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

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

$H$  = konstanta lentur

#### 2.6.4 Perencanaan Kolom

Panjang efektif kolom, atau KL, merupakan metode yang sederhana namun efektif untuk memprediksi kekuatan kolom. Metode ini dilakukan dengan menentukan korelasi mode tekuk yang sesuai 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 berdasarkan pedoman SNI 1729:2020 pasal E2 yaitu :

$$L_c = K \times L \dots\dots\dots (2.27)$$

Dengan:

$L_c$  = Panjang efektif batang tekan (mm)

$K$  = Faktor panjang efektif (lihat Gambar 2.5)

$L$  = Panjang batang tekan (mm)

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

$$\frac{L_c}{r} \leq 200 \dots\dots\dots (2.27a)$$

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

Menilai kondisi ideal dari titik pivot dalam praktik tidaklah mudah, sehingga disarankan untuk meningkatkan nilai  $K$ . Meskipun implementasinya akurat, proses ini tidaklah sederhana dan memerlukan penyederhanaan terhadap struktur riil yang kompleks terlebih dahulu. Dalam hal ini, kita dapat mulai dengan membaginya menjadi dua kategori berdasarkan nilai  $K$  yang berbeda, yaitu:

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

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

Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Nilai $\lambda$ , teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai $\lambda$ , yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi ideal	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung						

Gambar 2. 17 Nilai K untuk kolom dengan ujung-ujung yang ideal  
Sumber: SNI 1729-2020

#### 2.6.4.1 Perencanaan (Balok – Kolom)

Dalam mendesain struktur baja, pemilihan elemen struktur sangat bergantung pada jenis beban yang akan diterima. Batang baja yang berfungsi untuk menyerap gaya aksial paling cocok diterapkan pada struktur rangka batang, di mana beban terutama ditransfer melalui simpul dan beban mati relatif rendah dibandingkan dengan beban luar yang bekerja. Sebaliknya, batang baja yang mengalami momen lentur dominan lebih tepat digunakan dalam struktur balok, di mana momen lentur memiliki pengaruh yang jauh lebih besar daripada gaya geser.

Namun, untuk struktur yang lebih kompleks, di mana elemen batang harus mampu menyerap kombinasi gaya aksial dan momen secara bersamaan, diperlukan pendekatan yang berbeda, yakni penerapan konsep perhitungan batang portal (beam-support). Dalam perencanaan elemen portal, terdapat dua aspek kekuatan yang perlu diperhatikan: kekuatan tekan akibat gaya aksial dan kekuatan lentur akibat momen. Kedua gaya ini dihubungkan melalui persamaan interaksi yang mempertimbangkan kontribusi simultan dari kedua gaya tersebut, sehingga memastikan desain struktur yang menyeluruh dan aman.

Apabila ;

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

Maka :

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

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

Maka;

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

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

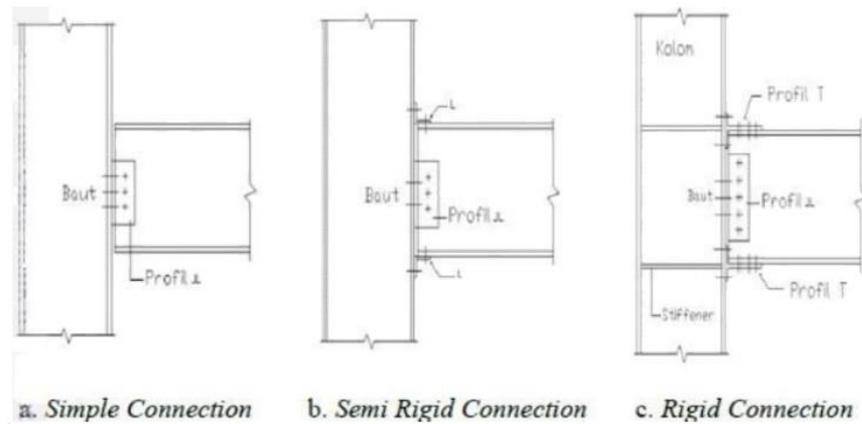
### 2.6.5 Sambungan

Sambungan merupakan hal yang krusial dalam struktur baja yang berfungsi untuk secara mekanis menghubungkan elemen-elemen struktur pada lokasi yang telah ditentukan. Tugas utamanya adalah mentransfer gaya dan momen di antara elemen-elemen tersebut, di mana pengikat berperan sebagai area interaksi antara komponen yang saling terhubung. Dalam konstruksi menggunakan baja canai panas, terdapat dua jenis sambungan utama, yaitu sambungan baut dan sambungan las. Untuk baja *cold-formed*, pilihan sambungan lebih beragam, mencakup *self-tapping screws*, baut, pengelasan di tempat, pin, *clinchng*, *puddle welding*, paku, dan *self-piercing rivets*.

Berdasarkan kemampuan menahan momen, sambungan dibagi menjadi tiga kategori:

- a. Sambungan kaku (*rigid connection*) tidak memiliki kekakuan puntir yang dapat mempertahankan sudut di antara mereka..
- b. Sambungan semi kaku (*semi rigid connection*) memiliki kapasitas terbatas untuk memberikan kekangan terhadap perubahan sudut.

- c. Sementara sambungan sendi (*simple connection*) dirancang bebas momen, memungkinkan rotasi tanpa menghasilkan momen lentur pada komponen struktur yang disambung.



Gambar 2. 18 Sambungan Pada Baja  
Sumber: SNI 7972-2020

### 2.6.5.1 Parameter Desain Sambungan

#### a. Faktor Ketahanan

Bila kekuatan tersedia dihitung menurut *SNI Spesifikasi*, faktor ketahanan yang disyaratkan di dalamnya harus diterapkan. Apabila kekuatan tersedia dihitung menurut Standar ini, faktor ketahanan  $\phi d$  dan  $\phi n$  harus digunakan seperti disyaratkan dalam pasal yang berlaku dari Standar ini. Nilai  $\phi d$  dan  $\phi n$  harus diambil sebagai berikut:

- a) Untuk keadaan batas duktail  $\phi d = 1,00$
- b) Untuk keadaan batas nonduktail  $\phi n = 0,90$

#### b. Lokasi Sendi Plastis

Jarak sendi plastis dari muka kolom,  $Sh$ , harus diambil menurut persyaratan untuk sambungan individual seperti disyaratkan di SNI.

#### c. Momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_e$$

$R_y$  = rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi  $F_y$  seperti disyaratkan dalam SNI Ketentuan Seismik.

$Z_e$  = modulus penampang plastis efektif dari penampang (atau sambungan) pada lokasi sendi plastis, in.3 (mm<sup>3</sup>)

$C_{pr}$  = faktor untuk memperkirakan kekuatan puncak sambungan, termasuk pengerasan regangan, pengekangan lokal, penguatan/penulangan tambahan, dan kondisi-kondisi sambungan lainnya. Kecuali selain itu secara khusus dinyatakan dalam standar ini, nilai  $C_{pr}$  harus

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1,2$$

$F_y$  = Tegangan leleh minimum terspesifikasi dari pelelehan elemen, ksi (Mpa)

$F_u$  = Kekuatan tarik minimum terspesifikasi dari pelelehan elemen, ksi (Mpa)

### 2.6.5.2 Sambungan Baut

Dalam konstruksi baja, terdapat tiga jenis sambungan yang umum digunakan, yaitu sambungan baut, sambungan las, dan sambungan paku keling. Namun, dalam praktiknya, sambungan baut dan sambungan las seringkali menjadi pilihan utama. Dalam upaya mencapai daktilitas yang tinggi dan kinerja yang andal, dua konsep utama telah diadopsi: penguatan sambungan dan pelemahan sambungan balok-ke-kolom, yang bertujuan untuk mencegah kerusakan pada kolom. Sambungan ini sangat krusial karena berfungsi sebagai titik tumpu beban yang ditanggung oleh bangunan.

Penggunaan sekrup dalam struktur baja dapat mempercepat proses konstruksi. Menurut Sulistyono (2019), dibandingkan dengan sambungan paku keling dan las, sambungan baut tidak memerlukan pekerja dengan keterampilan tinggi, sehingga membuat struktur baja dengan sambungan baut menjadi lebih ekonomis.

#### a. Dasar Perencanaan Baut

Sambungan baut merupakan salah satu metode penghubung yang umum digunakan dalam konstruksi struktur baja. Dibandingkan dengan metode sambungan lain, baut memiliki beberapa keunggulan praktis. Menurut Yudha Lesmana (2021), kelebihan sambungan baut antara lain:

- a. Pemasangannya mudah dan cepat. Tidak diperlukan keahlian khusus untuk memasang baut, sehingga proses konstruksi menjadi lebih sederhana.

- b. Dari segi biaya, upah pekerja untuk pemasangan baut lebih ekonomis jika dibandingkan dengan sambungan las.
- c. Peralatan untuk pemasangan sambungan baut relatif murah. Meskipun memiliki banyak keunggulan, sambungan baut tetap memerlukan perhitungan dan perencanaan yang cermat sesuai standar konstruksi yang berlaku.

Dengan berpedoman pada SNI 1729:2020 tabel J3.2, kuat nominal pengencang baut pada 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

### b. Tahanan Nominal Baut

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

$$R_u \leq \phi R_n \dots\dots\dots(2.30a)$$

Dengan  $R_n$  adalah tahanan nominal baut dan  $\phi$  adalah faktor reduksi sebesar 0,75.  $R_n$  memiliki besaran yang berbeda tergantung jenis baut.

### c. Kekuatan Tarik dan Geser Baut

Kekuatan tarik atau geser yang terukur, yaitu  $fR_n$ , serta kekuatan tarik atau geser yang diizinkan,  $R_n/W$ , dari baut atau komponen ulir berkekuatan tinggi yang telah dikencangkan atau diprestress dengan benar, perlu ditentukan sebagai berikut, sesuai dengan kondisi batas kegagalan tarik atau geser:

$$R_n = F_n \cdot A_b \dots\dots\dots(2.30b)$$

Keterangan:

$F_n$ : tegangan tarik nominal,  $F_{nt}$  atau tegangan geser,  $F_{nw}$  ksi (Mpa)

$A_b$ : luas tubuh baut tidak berulir nominal atau bagian berulir ( $\text{mm}^2$ )

#### d. Kuat Geser Blok

Analisis geser blok (block shear) merupakan metode penting untuk mengevaluasi kekuatan sambungan baut dan mencegah kegagalan struktur di sekitar lubang baut. Metode ini sangat dipengaruhi oleh jarak dan posisi antar baut. Berbeda dengan mekanisme titik pivot yang hanya memanfaatkan sedikit baut, sambungan ini biasanya menggunakan jumlah baut yang lebih banyak. Pengelompokan baut dapat menyebabkan kegagalan pada satu blok berpengaruh pada seluruh kelompok baut tersebut. Dalam desain struktur, perhitungan kekuatan block shear sangat kritis untuk mencegah kegagalan struktural. Standar SNI 1729:2020 memberikan pedoman spesifik untuk menghitung kekuatan desain pada kondisi batas keruntuhan *block shear*.

$$R_n = (0,60 F_u \times A_{nt}) + (U_{bs} \times F_u \times A_{nt}) \leq (0,60 \times F_v \times A_{gv}) + (U_{bs} \times F_u \times A_{nt})$$

Keterangan :

- $U_{bs}$  = 1,0 jika tegangan tarik tidak seragam
- = 0,5 jika tegangan yang mengalami geser
- A = Luasan neton yang mengalami geser
- $\phi$  = 0,75

#### e. Mekanisme Slip Kritis Baut



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

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

$$R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_f \cdot T_b \cdot n_s \dots\dots\dots (2.31a)$$

Keterangan :

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

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

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

$T_b$  = gaya tarik baut prategang minimum

$n_s$  = jumlah permukaan yang menimbulkan bidang kontak

Kuat batas slip-kritis,  $R_u = \phi R_n$ , dimana nilai  $\phi$  tergantung bentuk dan ukuran lubang bautnya. Jika lubang standar atau lubang slot pendek yang dipasang tegak lurus arah beban,  $\phi = 1,0$ . Untuk lubang oversize dan slot pendek tetapi dipasang sejajar ke beban maka  $\phi = 0,85$ . Jika lubangnya adalah slot-panjang maka  $\phi = 0,70$ .

**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

#### f. 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.

$$R_n = 1,2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.31b)$$

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

$$R_n = 1,5 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 3,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.31c)$$

dimana :

$l_c$  = 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)

$F_u$  = 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:

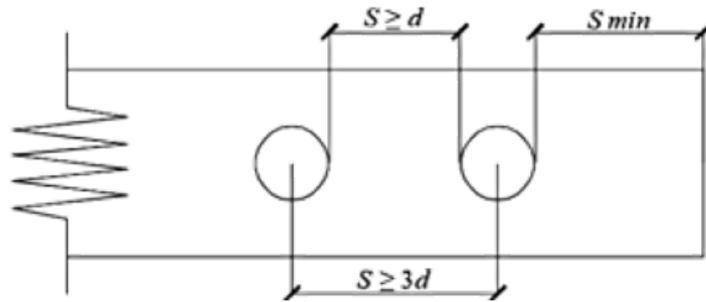
$$R_n = 1,0 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots\dots\dots (2.31d)$$

#### **g. Perhitungan Jarak Antar Baut**

Dalam pemasangan baut, jarak antar baut menjadi faktor kritis yang perlu diperhatikan secara seksama. Hal ini bertujuan untuk memastikan baut dapat memikul beban sesuai kemampuannya dan memudahkan proses instalasi. Berdasarkan SNI 1729:2020, terdapat beberapa ketentuan penting terkait jarak baut:

- a. Spasi minimum antar baut. Jarak as ke as antar lubang baut tidak boleh kurang dari 2,23 kali diameter nominal ( $d$ ). Di lapangan, nilai ini biasanya dibulatkan menjadi 3, sehingga dapat diterapkan dengan rumus  $S \geq 3d$ . Jarak bersih antar lubang baut juga tidak boleh kurang dari diameter baut itu sendiri.
- b. Jarak tepi minimum. Jarak pusat lubang baut ke tepi sambungan harus mengacu pada tabel J3.3 dan J3.3M dalam SNI 1729:2020. Ketentuan ini mencegah baut dipasang terlalu dekat dengan tepi profil yang dapat menyebabkan kerusakan atau sobekan pada material baja.

- c. Spasi maksimum. Jarak maksimum dari pusat lubang baut ke tepi terdekat pada bagian yang disambung dibatasi hingga 12 kali ketebalan bagian tersebut, dengan batasan maksimal 150 mm.



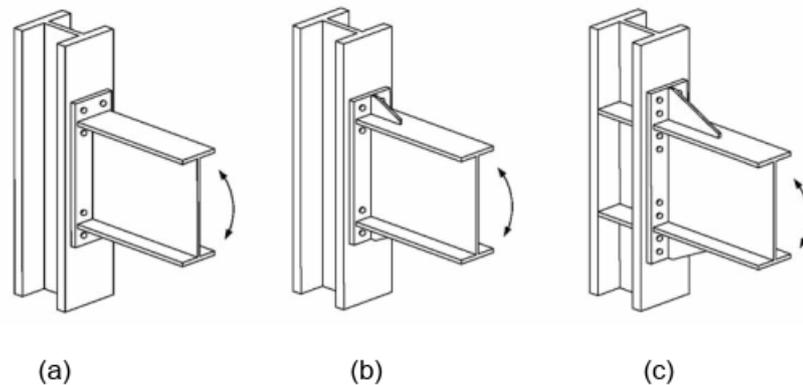
**Gambar 2. 19** Jarak Antar Baut  
Sumber: SNI 1729-2020

### 2.6.5.3 Sambungan Momen Pelat Ujung Berbaut Diperpanjang Tanpa dan Dengan Pengaku

Sambungan pelat ujung yang menggunakan baut dirancang dengan mengelas balok pada pelat ujung dan membaut pelat tersebut ke sayap kolom. Dalam bab ini, akan dibahas tiga konfigurasi pelat ujung yang tertera pada gambar, yang semuanya memenuhi syarat berdasarkan pedoman dalam Standar yang berlaku.

Perilaku sambungan jenis ini dipengaruhi oleh berbagai kondisi batas, antara lain, pelelehan lentur pada penampang balok, pelelehan lentur pada pelat ujung, pelelehan zona pada pelat kolom, kegagalan tarik pada baut pelat ujung, kegagalan geser pada baut pelat ujung, serta kegagalan pada berbagai jenis sambungan las. Kriteria desain menetapkan agar kekuatan pengencang cukup untuk memastikan bahwa deformasi inelastis pada sambungan terjadi akibat pelelehan balok.

1. Tinggi penampang nominal balok tidak kurang dari 24 in. (600 mm)



**Gambar 2. 20** konfigurasi pelat ujung diperpanjang :

(a) empat baut tanpa pengaku, 4E; (b) empat baut dengan pengaku, 4ES; (c) delapan baut dengan pengaku, 8ES

**Tabel 2. 5** Pembatasan Parametrik pada prakualifikasi

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

$t$  = tebal pelat ujung, in. (mm)

2. Tidak ada konektor geser dalam 1,5 kali tinggi penampang balok dari muka sayap kolom yang disambung
3. Pelat beton struktural diletakkan paling sedikit 1 in. (25 mm) dari kedua sisi dari kedua sayap kolom. Diizinkan untuk menempatkan material kompresibel di celah antara sayap kolom dan pelat beton struktural.

#### 2.6.5.4 Sambungan Las

Proses penyambungan bahan logam melibatkan peleburan bahan melalui pemanasan pada suhu yang tepat. Proses ini dapat dilakukan dengan atau tanpa pemberian tekanan serta dengan atau tanpa menggunakan bahan pengisi.

##### a. Jenis Sambungan Las

Las tumpul digunakan untuk menyambung batang pada suatu bidang. Karena las ini harus mampu menyerap seluruh beban kerja, maka kekuatannya perlu setara dengan kekuatan bidang yang disambung. Sementara itu, las sudut merupakan jenis las yang paling umum digunakan, mencakup sekitar 80% dari seluruh proses pengelasan. Keunggulan las sudut terletak pada kenyataannya bahwa ia tidak memerlukan tingkat ketelitian yang tinggi. Di sisi lain, las baji dan duri biasanya digunakan bersamaan dengan las sudut. Salah satu keuntungan utama dari jenis pengelasan ini adalah kemampuannya mengatasi hambatan geser pada sambungan silang bila panjang las sudut diperpanjang.

##### b. Tahanan Nominal

Persyaratan keamanan suatu struktur dalam hal ini adalah terpenuhinya persamaan:  $\phi R_{nw} \geq R_u$  .....(2.32)

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

$$\phi R_{nw} = 0,75 \cdot t_e (0,6 \cdot f_u) \text{ (bahan dasar)}$$

$$\phi R_{nw} = 0,75 \cdot t_e (0,6 \cdot f_{uw}) \text{ (las)}$$

Dengan:  $\phi$  = faktor ketahanan

$R_u$  = beban terfaktor per satuan panjang las

$R_{nw}$  = tahanan nominal per satuan panjang las