

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Perencanaan

2.1.1. Struktur Baja

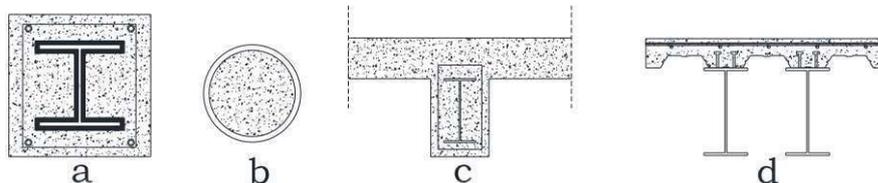
Struktur baja adalah merupakan material terbarukan yang dapat digunakan pada struktur bangunan baik bangunan gedung maupun bangunan jembatan. Dalam konstruksi modern, struktur baja digunakan untuk hampir setiap jenis struktur termasuk bangunan industri berat, bangunan bertingkat tinggi, sistem pendukung peralatan, infrastruktur, jembatan, menara, terminal bandara, pabrik industri berat, rak pipa, dll. (Zega dkk., 2022)

2.1.2. Struktur Komposit

Struktur komposit merupakan struktur yang terdiri dari dua atau lebih material berbeda sifat dan karakteristik yang berkerja bersama sama untuk memikul beban yang berkerja pada suatu struktur, dalam hal ini digunakan material baja dan beton. Perbedaan dengan beton bertulang terdapat pada pemikul gaya tariknya. pada struktur beton bertulang, gaya tarik dipikul oleh tulangan baja. Sedangkan pada struktur komposit, gaya tarik dipikul oleh elemen profil baja. (Fauzi dkk., 2018)

Pada umumnya struktur komposit berupa sebagai berikut :

1. Kolom baja terbungkus beton (a & c)
2. Kolom baja berisi beton (b)
3. Balok baja menahan slab beton (d)



Gambar 2. 1 Macam – Macam Struktur Komposit

2.1.3. Struktur Tahan Gempa

Struktur bangunan tahan gempa adalah bangunan yang bisa merespons gempa, dengan sikap bertahan dari keruntuhan dan bersifat fleksibel untuk meredam getaran gempa. Umumnya bangunan tahan gempa direncanakan dengan prosedur yang ditulis dalam peraturan perencanaan bangunan (*building codes*). Peraturan dibuat untuk menjamin keselamatan penghuni terhadap gempa besar yang mungkin terjadi, dan untuk menghindari atau mengurangi kerusakan atau kerugian harta benda terhadap gempa sedang yang sering terjadi. (Dewobroto, 2016)

2.1.3.1. Sistem Portal Pemikul Momen (*Moment Frame Systems*)

a. *Special Moment Frames (SMF)*

Special Moment Frame (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus) Jenis ini didesain untuk dapat bekerja secara inelastis penuh. Oleh karena itu pada bagian yang akan mengalami sendi-plastis perlu didesain secara khusus. Cocok dipakai untuk perencanaan gedung tinggi yang masih memungkinkan dengan *sistem frame*.

b. *Intermediate Moment Frames (IMF)*

Intermediate Moment Frames (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah) Jenis rangka ini mirip SMF, yaitu mampu berperilaku inelastis tetapi terbatas. Cocok dipakai untuk sistem struktur dengan gempa yang relatif sedang, misalkan pada bangunan yang bertingkat rendah.

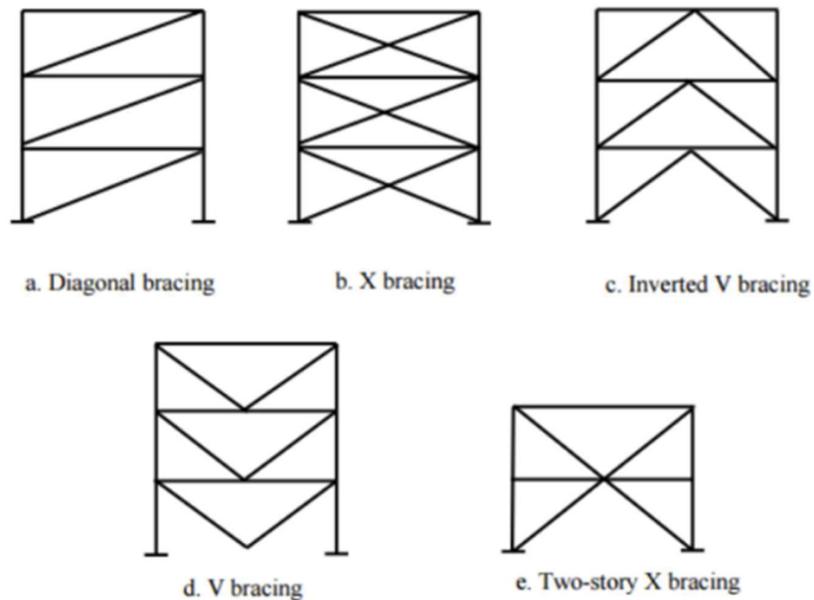
c. *Ordinary Moment Frames (OMF)*

Ordinary moment frames (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa) Ini adalah jenis rangka yang didesain untuk bekerja secara elastis saja. Oleh karena itu hanya cocok dipakai untuk sistem struktur dengan beban gravitasi yang dominan, misalkan pada bangunan tidak bertingkat yang memiliki bentang panjang.

2.1.3.2. Sistem Rangka *Bracing (Braced Frame Systems)*

a. *Special Concentrically Braced Frames (SCBF)*

SCBF adalah struktur rangka baja yang paling umum dipakai pada konstruksi tahan gempa di daerah gempa besar. Rangka yang menganut SCBF direncanakan secara khusus sehingga *bracing* bekerja sebagai elemen melalui aksi tekuk tekan atau leleh tarik batang diagonal saat terjadi gempa besar.



Gambar 2. 2 Tipe Rangka *Bracing* Konsentrik

Bracing adalah elemen struktur tambahan yang digunakan jika ingin menjadikan struktur portal lebih kaku (tidak bergoyang). *Bracing* direncanakan memikul beban aksial yang bisa menyebabkan tarik dan tekan. Pada saat terjadi gempa, *Bracing* memiliki dua kemungkinan perilaku yaitu perilaku tekuk akibat tekan dan leleh atau fraktur akibat tarik. Adapun macam - macam pemasangan *Bracing* diantaranya adalah *Single Diagonal Braced*, *Two Story X-Bracing*, *V-Bracing* dan *Inverted V-Bracing*.

b. Ordinary Concentrically Braced Frames (OCBF)

Sama halnya seperti sistem SCBF, yaitu mengandalkan perilaku aksial pada elemen-elemen strukturalnya. Oleh karena itu sistem rangka ini cenderung kaku, sehingga dianggap sebagai rangka yang tak bergoyang. Tapi, sistem ini akan bekerja

dengan baik jika berperilaku elastik saat gempa besar, sehingga hanya cocok jika diterapkan pada struktur yang lebih dipengaruhi beban - beban rencana yang sudah pasti letak keberadaannya (beban mati) atau beban gravitasi.

c. *Eccentrically Braced Frames (EBF)*

Pada rangka jenis EBF ini cara kerjanya mirip dengan SCBF hanya saja elemen diharapkan bekerja secara inelastis memanfaatkan adanya leleh geser atau leleh lentur.

2.2. Pembebanan Struktur

Pembebanan merupakan hal yang paling awal diperhitungkan dalam perencanaan dan analisis gedung. Umumnya pembebanan pada struktur gedung dikelompokkan menjadi dua berdasarkan arah kerjanya yakni beban vertikal dan horizontal. Beban vertikal yang bekerja pada struktur gedung meliputi beban mati (D) dan beban hidup (L), sedangkan beban horizontal berupa beban angin serta beban gempa.

2.3. Gaya Geser Dasar Akibat Gempa

Besarnya gaya geser dasar ditentukan pada persamaan dibawah ini :

$$V = C_s \cdot W \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

C_s = Koefisien respon dari gempa

W = Berat dari bangunan

2.4. Koefisien Respon Seismik

Koefisien respon gempa dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut ini :

$$C_s = \frac{SDS}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

S_{DS} = Parameter dari percepatan spectrum desain

R = Faktor modifikasi respon

I_e = Faktor keutamaan dari gempa

2.5. Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Pada SNI 1726-2019 ditentukan bahwa Gaya lateral dari gempa (F_x) dengan satuan (kN) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dengan persamaan berikut ini :

$$F_x = C_{VX} \cdot V \dots\dots\dots (2.3a)$$

Dan

$$C_{VX} = \frac{w_x h_x^k}{\sum (w_i h_i^k)} \dots\dots\dots (2.3b)$$

Keterangan :

C_{VX} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya lateral desain total geser pada dasar struktur (kN)

W_i dan W_x = Berat efektif dari total struktur pada tingkat y yang ditinjau

h_i dan h_x = Tinggi dasar struktur sampai tingkat yang ditinjau

k = Eksponen terkait dengan periode struktur sebagai berikut:

$T \leq 0,5$ detik, maka $k = 1$; $T \geq 2,5$ detik, maka $k = 2$

Jika T antara 0,5 – 2,5 detik, maka harus dilakukan dengan interpolasi

2.6. Distribusi Horizontal Gaya Gempa

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

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

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

Geser tingkat desain seismik, V_x (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.

2.7. Metode Load Resistance and Factor Design (LRFD)

Perencanaan dengan metode LRFD dianggap telah memenuhi syarat jika kuat perlu, R_u lebih kecil dari kuat rencana, ϕR_n dengan ϕ adalah faktor tahanan yang nilainya tergantung perilaku aksi dari komponen yang sedang ditinjau. Konsep dasar ketentuan dari metode LRFD adalah :

$$R_u \leq \phi R_n \dots\dots\dots (2.5)$$

Kuat perlu, R_u adalah nilai maksimum dari berbagai kombinasi beban terfaktor yang dicari dengan bantuan analisis struktur. Untuk mencari kuat perlu, R_u untuk tiap-tiap elemen struktur, maka diperlukannya analisa struktur secara menyeluruh. Faktor kombinasi beban disiapkan untuk analisis struktur dengan cara elastis. Jika alat analisis struktur dilengkapi opsi memperhitungkan efek P- Δ (nonlinier geometri), maka ketentuan analisis stabilitas struktur, (Chapter C – AISC 2010) selain menggunakan *Effective Length Method* (ELM) juga dapat juga menggunakan *Direct Analysis Method* (DAM).

Hasil dari analisis struktur secara menyeluruh untuk R_u selanjutnya digunakan untuk meninjau per-elemen diperlukan karena karakter untuk setiap aksi dan perilaku keruntuhannya dimungkinkan bisa berbeda-beda. (Dewobroto, 2016).

Tabel 2. 1 Faktor Tahanan ϕ

Komponen Struktur	Faktor Tahanan ϕ
Lentur	0,90
Tekan Aksial	0,90
Tarik Aksial	
- Tarik Leleh	0,90
- Tarik Fraktur	0,75
Geser	0,90

Sambungan Baut	
- Baut Geser	0,75
- Baut Tarik	0,75
- Kombinasi Geser Dan Tarik	0,75
- Baut Tumpu	0,75
Sambungan Las	
- Las Tumpul Penetrasi Penuh	0,90
- Las Sudut/Tumpul Penetrasi Sebagian	0,75
- Las Pengisi	0,75

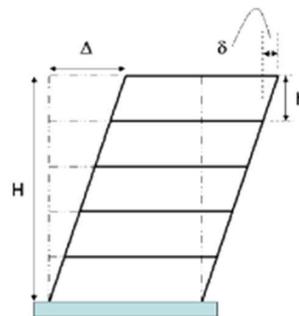
Sumber : *Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010, Wiryanto Dewobroto*

2.8. Perencanaan Stabilitas Struktur

Untuk merencanakan stabilitas struktur diperlukan kombinasi antara analisa dalam menentukan kuat perlu penampang dan desain, agar struktur memiliki kekuatan yang cukup sebagai penahan beban. Dengan itu bisa dilakukan beberapa pengecekan sebagai berikut:

2.8.1. *Drift Ratio*

Drift Ratio adalah perbandingan antara simpangan puncak dengan tinggi bangunan, Untuk mengetahui aman tidak bangunan ditentukan dengan besarnya nilai *drift ratio*. Semakin kecil nilai *drift ratio* maka menunjukkan bangunan itu juga semakin aman. Batasan *drift ratio* secara umum bisa diambil 0,0025 atau $H/400$.



Gambar 2. 3 *Drift Ratio*

Pada *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:

$$Drift\ ratio = (\Delta\ Top)/H \leq 0,0025 \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan

ΔTop = *Displacement* puncak bangunan (m)

H = Tinggi bangunan (m)

2.8.2. Simpangan Antar Tingkat

Untuk menentukan 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 Simpangan Antar Tingkat Izin Δa

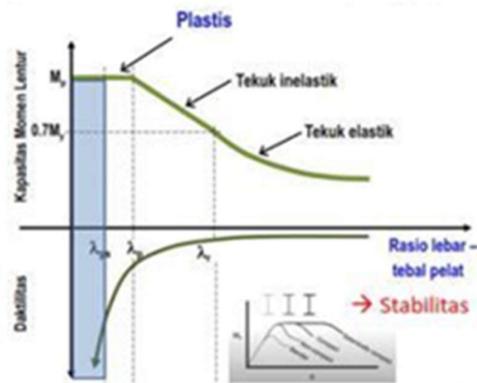
Struktur	Kategori resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	0,025h _{sx}	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}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

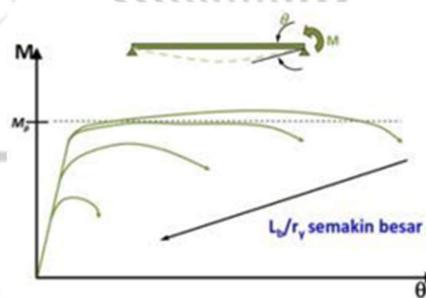
2.8.3. Daktilitas

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 dkk., 2019)



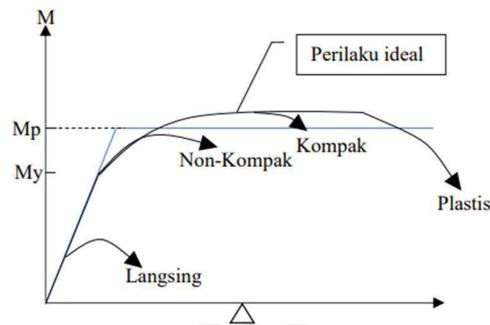
Gambar 2. 4 Duktilitas pada penampang



Gambar 2. 5 Duktilitas pada elemen balok

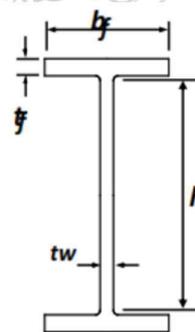
2.9. Stabilitas Penampang Baja

Sebelum dilakukan perencanaan struktur baja khususnya terhadap elemen lentur, maka perlu diketahui terlebih dahulu klasifikasi elemen - elemen penyusun profil karena akan dipakai sebagai dasar dalam perhitungan kuat lentur nominal (M_n). 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 $\leq \lambda_{hdm}$

Bagian sayap:

$$\frac{b}{t_f} = \frac{b_f}{2t_f} \leq \lambda_{hd} = 0,32 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Bagian Badan:

Untuk $C_a \leq 0,114$

$$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} = 2,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (1 - 1,04 C_a) \dots\dots\dots (2.8a)$$

Untuk $C_a > 0,114$

$$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} = 0,88 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (2,68 - C_a) \geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \dots\dots\dots (2.8b)$$

Dimana :

$$C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y} \text{ (LRFD)}$$

Daktilitas Sedang (*Moderately Ductile Member*)

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

Bagian sayap

$$\frac{b}{tf} = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda_{md} = 0,40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Bagian Badan

Untuk $C_a \leq 0,114$

$$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{md} = 3,96 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (1 - 3,04 C_a) \dots\dots\dots (2.10a)$$

Untuk $C_a > 0,114$

$$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{md} = 1,29 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (2,12 - C_a) \geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \dots\dots\dots (2.10b)$$

Dimana :

$$C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y} \text{ (LRFD)}$$

3. Penampang diklasifikasikan menjadi penampang Langsing dan tidak langsing apabila semua elemen tekan mempunyai rasio: $\lambda \geq \lambda_r$

Sayap:

$$\lambda = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Badan:

$$\lambda = \frac{h}{tw} \leq \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.12)$$

a) Penampang Kompak

$$M_n = M_p = Z \cdot f_y \dots\dots\dots (2.13a)$$

Yang menyatakan bahwa :

M_n = Momen plastis (Nmm)

F_y = Tegangan leleh baja (Mpa)

$$Z_x = b \cdot t_f (d - t_f) + \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (d - t_f)^2 \text{ untuk profil WF, mm}^3 \dots \dots \dots (2.13b)$$

$$Z_y = \frac{1}{2} \cdot b^2 \cdot t_f + \frac{1}{2} \cdot t_w^2 \cdot (d - t_f) \text{ untuk profil WF, mm}^3 \dots \dots \dots (2.13c)$$

b = lebar pada sayap (mm)

d = tinggi pada penampang (mm)

t_f = tebal pada sayap (mm)

t_w = tebal pada badan (mm)

b) Penampang Tak Kompak

$$M_n = M_p - (M_p - M) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \dots \dots \dots (2.14a)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \times S \dots \dots \dots (2.14b)$$

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

c) Penampang Langsing

$$M_n = M_r \left(\frac{\lambda}{b} \right)^2 \dots \dots \dots (2.15)$$

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 Daktilil Sedang dan Daktilil Tinggi

	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batasan Rasio Terhadap Tebal
Deskripsi dari Elemen	$\lambda h d m$	$\lambda m d m$
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	$0,40\sqrt{E/Fy}$
Sayap profil fondasi tiang H menurut Pasal D4	b/t	Tidak Berlaku
Badan profil T	d/t	$0,32\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Dinding PSR persegi	b/t	
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	$0,65\sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
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) Dinding PSR persegi	b/t	$1,18 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
2) Sayap dan pelat samping profil I kotak, badan dan sayap profil kotak tersusun	h/t	$0,65 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
<p>Jika digunakan pada balok, kolom atau perangkai, sebagai pelat badan yang mengalami lentur atau kombinasi aksial-lentur:</p> <p>1) Badan profil I giras atau tersusun</p> <p>2) Pelat samping profil I kotak</p> <p>3) Badan profil kotak</p>	<p>Untuk $Ca \leq 0,114$</p> <p>$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} = 2,57 \sqrt{\frac{E}{RyFy} (1-1,04Ca)}$</p> <p>Untuk $Ca \geq 0,114$</p> <p>$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} 0,88 \sqrt{\frac{E}{RyFy} (2,68-Ca) \geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{Fy}}}$</p> <p>Dimana :</p> <p>$Ca = \frac{Pw}{\phi c Fy}$ (LRFD)</p> <p>Untuk $Ca \leq 0,114$</p> <p>$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} = 3,96 \sqrt{\frac{E}{RyFy} (1-3,04Ca)}$</p> <p>Untuk $Ca \geq 0,114$</p> <p>$\frac{h}{tw} \leq \lambda_{hd} 1,29 \sqrt{\frac{E}{RyFy} (2,68-Ca) \geq 1,57 \sqrt{\frac{E}{Fy}}}$</p> <p>Dimana :</p> <p>$Ca = \frac{Pw}{\phi c Fy}$ (LRFD)</p>	
Badan profil kotak tersusun	h/t	$1,75 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Badan profil fondasi tiang H	h/tw	Tidak berlaku
Dinding PSR bulat	d/t	$0,053 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Dinding komponen struktur komposit terisi beton persegi	b/t	$1,48 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$
Dinding komponen struktur komposit terisi beton bundar	d/t	$0,085 \sqrt{\frac{E}{RyFy}}$

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 (lansing/nonlansing)	
			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 tersusun 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 Badanprofil simetris tunggal	hc/tw	$\frac{hc}{hp} \sqrt{\frac{E}{fy}} < \lambda r$ $(0,54 \frac{Mp}{My} - 0,09)$	$5,70 \frac{E}{fy}$
	8 Sayap PSR Persegi Panjang	b/t	$1,12 \frac{E}{fy}$	$1,40 \frac{E}{fy}$

Sumber : SNI 1729-2020

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	Batas rasio lebar terhadap tebal	
				λhd	λmd

		λr (langsing/non langsing)				
Elemen tidak kaku	1	Sayap profil I di gilaspanas, pelat yang diproyeksikan dari profil I gilaspanas, kaki berdiri bebas dari sepasang sikusambung 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 perkakulainnya	b/t	$0,45 \frac{E}{fy}$	Tidak berlaku	Tidak berlaku
	4	Badan T	d/t	$0,75 Efy$	$0,32 \frac{E}{Ry \cdot fy}$	$0,4 \frac{E}{Ry \cdot fy}$

Sumber : SNI 1729-2020

2.10. Perencanaan Struktur 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

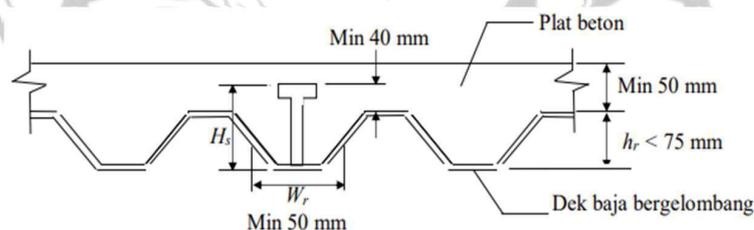
geser menjadi sangat penting karena merupakan komponen yang menjamin terjadinya sistem komposit antara beton dan baja (Cahyati, 2016).

2.10.1. Dak Baja Gelombang

Dak baja gelombang bisa dipakai sebagai bekisting pelat beton serta tulangan pelat beton. Penggunaan dak baja juga dapat dipertimbangkan sebagai dukungan dalam arah lateral dari balok sebelum beton mulai mengeras. Arah dari gelombang dak baja biasanya diletakkan tegak lurus dengan balok penopangnya. Dalam pemasangan dek baja saat di lapangan adalah dek baja dipasang pada arah bentang pendek balok. Biasanya untuk struktur komposit, digunakan pelat satu arah.

Persyaratan dak baja gelombang dan penghubung gesernya agar dapat digunakan pada komponen struktur komposit dapat dilihat pada SNI 1729-2020 pasal I3.2c yaitu :

1. Tinggi maksimum dak baja (h_r) kurang dari 75 mm.
2. Lebar rata-rata minimum dari dak gelombang (w_r) harus lebih besar dari 50 mm, Pelat beton disambungkan dengan balok baja menggunakan angkur *steel headed stud*, kemudian di las pada dak atau penampang melintang baja.
3. Tebal pelat di atas dek baja tidak boleh kurang dari 50 mm.
4. Dak baja harus diangkurkan ke semua komponen struktur pendukung pada spasi tidak lebih dari 460 mm.



Gambar 2. 8 Penampang Melintang Dak Baja Gelombang

Dalam merencanakan pelat atap yang menggunakan *floor deck* maka tulangan positif peranannya akan digantikan dengan *floor deck*. Besarnya nilai

momen kapasitas *floor deck* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$M_n = A_s \times f_y \left(d_{eff} - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.16a)$$

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 f_c \times b} \dots\dots\dots (2.16b)$$

Dalam perencanaan tulangan lapis atas, pertama-tama harus ditentukan rasio tulangan minimum. Berdasarkan SNI 2487-2019 pasal 9.6.1.2, nilai rasio tulangan minimum diambil yang terbesar antara dua persamaan berikut ini :

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (2.17a)$$

$$\rho_{maks} = 0,75 \cdot \rho_b \dots\dots\dots (2.18b)$$

atau,

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \dots\dots\dots (2.17c)$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \times b \times d^2} \dots\dots\dots (2.17d)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f_c'} \dots\dots\dots (2.17e)$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2m \cdot R_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.17f)$$

$$A_{sperlu} = \rho \times b \times d \dots\dots\dots (2.17g)$$

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

Tabel 2. 6 Luas penampang tulangan baja per meter Panjang pelat

Diameter batang (mm)	Luas Penampang (mm ²)								
	Jarak Spasi p.k.p (mm)								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
6	565,5	282,7	188,5	141,4	113,1	94,2	80,8	70,7	62,8
8	1005,3	502,7	335,1	251,3	201,1	167,6	143,6	125,7	111,7
	1272,3	636,2	424,1	318,1	254,5	212,1	181,8	159,0	141,4

9	1570,8	785,4	523,6	392,7	314,2	261,8	224,4	196,3	174,5
10	2261,9	1131,0	754,0	565,5	452,4	377,0	323,1	282,7	251,3
12	2654,6	1327,3	884,9	663,7	530,9	442,4	379,2	331,8	295,0
13	3078,8	1539,4	1026,3	769,7	615,8	513,1	439,8	384,8	342,1
14	4021,2	2010,6	1340,4	1005,3	804,2	670,2	574,5	502,7	446,8
16	5089,4	2544,7	1696,5	1272,3	1017,9	848,2	727,1	636,2	565,5
18	5670,6	2835,3	1890,2	1417,6	1134,1	945,1	810,1	708,8	630,1
19	6283,2	3141,6	2094,4	1570,8	1256,6	1047,2	897,6	785,4	698,1
20		3801,3	2534,2	1900,7	1520,5	1267,1	1086,1	950,3	844,7
22		4908,7	3272,5	2454,4	1963,5	1636,2	1402,5	1227,2	1090,8
25		6157,5	4105,0	3078,8	2463,0	2052,5	1759,3	1539,4	1368,3
28		6605,2	4403,5	3302,6	2642,1	2201,7	1887,2	1651,3	1467,8
29		8042,5	5361,7	4021,2	3217,0	2680,8	2297,9	2010,6	1787,2
32			6785,8	5089,4	4071,5	3392,9	2908,2	2544,7	2261,9
36			8377,6	6283,2	5026,5	4188,8	3590,4	3141,6	2792,5
40			13090,0	9817,5	7854,0	6545,0	5610,0	4908,7	4363,3

Sumber : Struktur beton bertulang Istimawan Dipohusodo

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	1/20	1/24	1/28	1/10
Balok atau pelat rusuk satu- arah	1/16	1/18,5	1/21	1/8

Sumber: SNI 2847-2019

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

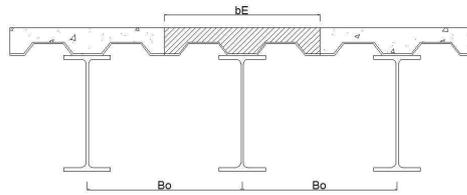
Tabel 2. 8 Lendutan Izin Maksimum yang dihitung				
Jenis komponen	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan	
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat Lr dan R maksimum	L/180	
		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

2.10.2. Lebar Efektif Balok

Dalam perencanaan sebuah struktur bangunan penting memperhitungkan lebar efektif. Terutama pada sebuah desain yang memiliki distribusi tegangan yang tidak seragam. Dengan perpedoman pada SNI 1729-2020 pasal I3.1 yang menyatakan bahwa lebar efektif pelat beton dapat diambil dari jumlah lebar efektif untuk setiap sisi sumbu balok, sehingga lebar efektif balok dapat menggunakan pernyataan sesuai dibawah ini :

- $b_E \leq \frac{1}{8}$ Bentang balok, jarak as ke as tumpuan
- $b_E \leq \frac{1}{8}$ Jarak antar sumbu berdekatan
- $b_E \leq$ Jarak ke tepi slab



Gambar 2. 9 Lebar Efektif balok

2.10.3. 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 :

$$\text{Luas transformasi} = \frac{bE}{n} \dots\dots\dots (2.18)$$

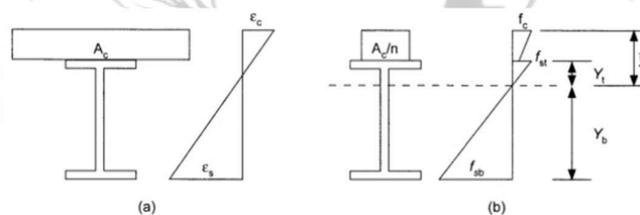
Dimana:

$$n \quad : \text{Rasio modular} = \frac{E_S}{E_C} \dots\dots\dots (2.18a)$$

E_S : Modulus elastis baja (200000 MPa)

E_C : Modulus elastis beton = $4700\sqrt{f'c}$ (MPa)

$f'c$: Kuat tekan rencana pada usia 28 hari (MPa)



Gambar 2. 10 Diagram Regangan Tegangan Balok Komposit

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

$$F_{st} : \frac{M x y_t}{I} \dots\dots\dots (2.18b)$$

$$F_{sb} : \frac{M x y_b}{I} \dots\dots\dots (2.18c)$$

$$F_C : \frac{M x \bar{y}}{n \times I} \dots\dots\dots (2.18d)$$

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

2.10.4. Kekuatan Lentur Nominal

2.10.4.1. Kuat Lentur Positif

Berdasarkan SNI 1729-2020 pasal I3.2a, kuat lentur positif desain ($\phi_b M_n$) dan kuat lentur positif yang diizinkan (M_n / Ω_b) harus diperhitungkan untuk keadaan batas leleh sebagai berikut :

- Untuk $\frac{h}{tw} \leq 3,76 \sqrt{E/Fy} \dots\dots\dots (2.19a)$

M_n harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis).

- Untuk $\frac{h}{tw} > 3,76 \sqrt{E/Fy} \dots\dots\dots (2.19b)$

M_n harus ditentukan dari superposisi tegangan elastis, dengan memperhitungkan efek penopangan, untuk keadaan batas leleh (momen leleh).

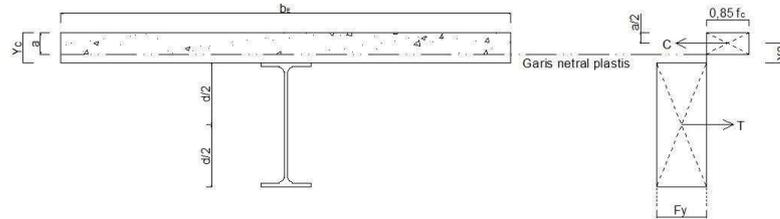
Dalam menghitung momen plastis sebuah balok komposit, harus dicari posisi sumbu netral plastis dimana tergantung pada proporsi C dan T, dengan nilai resultan gaya tekan dan tarik sebagai berikut :

$$C = 0,85 f'_c \times A_c \dots\dots\dots (2.20)$$

$$T = F_y \times A_s \dots \dots \dots (2.21)$$

Ada 3 kondisi distribusi tegangan plastis yang kemungkinan terjadi yaitu :

A. Jika Nilai $T \leq C$ sumbu netral plastis didalam pelat beton



Gambar 2. 11 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi a

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.

$$a = \frac{A_s \times F_y}{0,85 f_c' \times b \times d} \dots \dots \dots (2.22a)$$

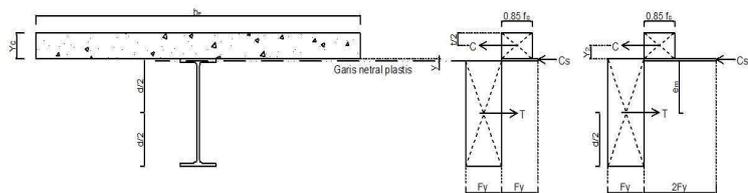
Asumsi benar jika $a < t_c$ jika pakai dek baja, atau $a < t$ pelat beton solid.

$$Y_c = h_r + t_c \dots \dots \dots (2.22b)$$

$$Y_2 = Y_c - \frac{1}{2} a \dots \dots \dots (2.22c)$$

$$M_n = M_p = F_y \times A_s \times (Y_2 + \frac{1}{2} d) \dots \dots \dots (2.22d)$$

B. Jika Nilai $T > C$ sumbu netral plastis di baja (pelat sayap)



Gambar 2. 12 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi b

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 $t_f > y > 0$ yang dihitung dengan rumusan berikut:

$$T = F_y \times A_s \dots\dots\dots (2.23a)$$

$$C = 0,85 f_c' \times b_E \times t_c \dots\dots\dots (2.23b)$$

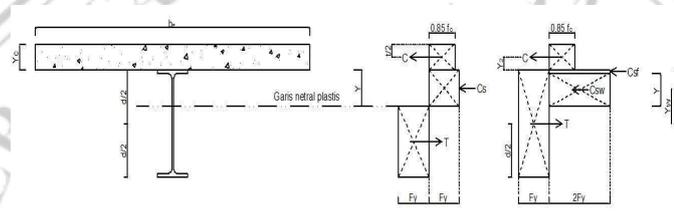
$$y = \frac{T - C}{b_f \times f_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.23c)$$

$$C_s = \frac{A_s \cdot F_y - c}{2} \dots\dots\dots (2.23d)$$

$$C_{sm} = 2F_y \times y \dots\dots\dots (2.23e)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + C_{sm} (d - y) \frac{1}{2} \dots\dots\dots (2.23f)$$

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



Gambar 2. 13 Distribusi Tegangan Plastis Kondisi c

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 :

$$T = F_y \times A_s \dots\dots\dots (2.24a)$$

$$C = 0,85 f_c' \times b_E \times t_c \dots\dots\dots (2.24b)$$

$$C_{sf} = b_f \times t_f \times 2F_y \dots\dots\dots (2.24c)$$

$$y = \frac{T - C - C_{sf}}{t_w \times f_y} \leq t_f \dots\dots\dots (2.24d)$$

$$C_{sw} = 2F_y \times y \times t_w \dots\dots\dots (2.24e)$$

$$y_f = \frac{1}{2} (d - t_f) \dots\dots\dots (2.24f)$$

$$y_w = \frac{1}{2} (d + y) - t_f \dots\dots\dots (2.24g)$$

$$M_n = M_p = C (Y_2 + \frac{1}{2} d) + (C_{sf} \times y_f) + (C_{sw} \times y_w) \dots\dots\dots (2.24h)$$

2.10.4.2. Kuat Lentur Negatif

Pada umumnya suatu komponen struktur komposit yang dapat didesain ada pada daerah momen positif, sedangkan pada daerah momen negatif menggunakan komponen struktur non komposit. Tetapi berdasarkan SNI 1729-2020 pasal I3.2b telah diperbolehkan menggunakan struktur komposit pada daerah momen negatif. Dengan syarat sebuah struktur memenuhi kriteria berikut ini:

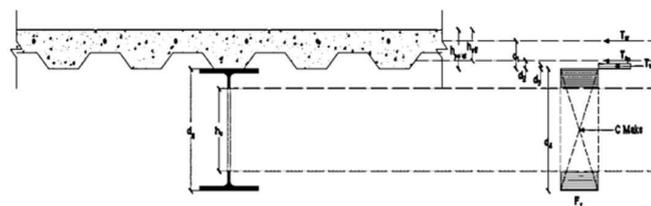
- Balok baja termasuk penampang kompak yang memiliki pengaku
- Pelat dengan balok baja disambung menggunakan angkur kanal baja pada daerah momen negatifnya
- Tulangan pelat yang sejajar dengan balok baja disalurkan pada lebar efektif pelat

Jika pada 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 :

$$T_{sr} = A_{sr} \times F_{y,sr} \dots\dots\dots (2.25a)$$

Gaya tekan maksimum dari profil baja adalah :

$$C_{maks} = A_s \times F_y \dots\dots\dots (2.25b)$$



Gambar 2. 14 Distribusi Tegangan Akibat Momen Negatif

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

$$T_{sr} + T_s = C_{maks} - T_s \dots\dots\dots(2.25c)$$

$$2T_s = C_{maks} - T_{sr} \dots\dots\dots(2.25d)$$

$$T_s = \frac{C_{maks} - T_{sr}}{2} \dots\dots\dots(2.25e)$$

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

Gaya pada badan, $T_w = T_s - T_f$

Jarak sumbu netral dari tepi bawah flens adalah :

$$a_w = \frac{T_w}{F_y \times t_w} \dots\dots\dots(2.25f)$$

Menentukan jarak gaya yang bekerja dari *centroid* :

$$d_1 = Y_c - \frac{t_c}{2}$$

$$d_2 = \frac{hr}{2}$$

$$d_3 = \frac{a_w}{2}$$

$$d_4 = \frac{d_g}{2}$$

$$M_n = T_{sr} (d_1 + d_4) + T_{sp} (d_2 \times d_4) + T_s (d_4 - d_3) \dots\dots\dots(2.25g)$$

2.10.4.3. Kuat Geser Nominal

Berdasarkan pada SNI 1729-2020 pasal G2 (*Komponen Struktur Profil I dan Kanal*), untuk memperhitungkan kuat geser nominal dapat ditentukan dengan persamaan :

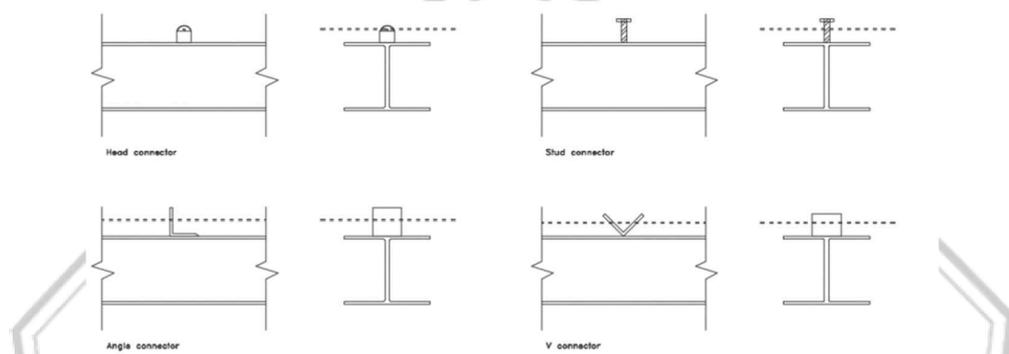
$$\frac{h}{t_w} > 2,24 \sqrt{E/F_y} \dots\dots\dots(2.25h)$$

$$V_n = 0,6 F_y \times A_w \times C_{vl} \dots\dots\dots(2.25i)$$

Keterangan :

- V_n = Kuat geser nominal (N)
- ϕ_v = Faktor tahanan untuk geser (0,90)
- A_w = Luas badan (mm^2)
- C_{v1} = 1,0

2.10.4.4. Penghubung Geser Angkur Baja Stad Berkepala



Gambar 2. 15 Macam – macam penghubung geser

Berdasarkan pada SNI 1729-2020 pasal I8 (Angkur Baja), diameter angkur baja stad berkepala (*steel headed stud*) harus kurang dari 19 mm dan juga tidak boleh lebih besar dari 2,5 kali ketebalan logam dasar. Serta panjang dari angkur *steel headed stud* harus lebih besar empat kali dari diameter batang dihitung dari dasar angkur steel headed stud pada bagian atas kepala batang setelah pemasangan. Kuat geser nominal satu angkur yang ditanamkan pada pelat beton maupun pelat komposit dengan dek baja dapat menggunakan persamaan berikut ini :

$$Q_n = 0,5 A_{sa} \sqrt{f_c' x E_c} \leq R_g \times R_p \times A_{sa} \times F_u \dots \dots \dots (2.26a)$$

Keterangan :

- A_{sa} = Luas penampang dari angkur baja (mm^2)
- E_c = Modulus elastisitas beton (Mpa)
- F_u = Kuat tarik minimum (MPa)

Tabel 2. 9 Nilai R_g dan R_p

Kondisi	R_g	R_p
Dak di diorientasikan paralel terhadap profil baja		
$\frac{W_r}{h_r} \geq 1,5$	1,0	0,75
$\frac{W_r}{h_r} < 1,5$	0,85	0,75
Dak diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja Jumlah ankur baja stad berkepala yang memiliki rusuk dak yang sama		
1	1,0	0,6
2	0,85	0,6
3 atau lebih	0,7	0,6

Keterangan :

W_r = Tinggi rusuk nominal (mm)

h_r = Lebar rata-rata rusuk (mm)

Sumber : SNI 1729-2020

Sedangkan untuk kuat geser nominal satu ankur kanal gelas panas yang ditanam pada slab beton solid harus ditentukan sebagai berikut:

$$Q_n = 0,3(t_f + 0,5t_w)L_a \sqrt{f'c'x Ec} \dots\dots\dots(2.26b)$$

Keterangan :

L_a = Panjang ankur kanal (mm)

t_f = Tebal sayap ankur kanal (mm)

t_w = Tebal badan ankur kanal (mm)

Jadi untuk kuat ankur kanal harus ditingkatkan dengan cara pengelasan kanal ke sayap balok untuk suatu gaya yang sama dengan Q_n , dengan memperhitungkan eksentrisitas pada ankur. Untuk jumlah aja yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$V' = F_y \times A_s \dots\dots\dots(2.27a)$$

$$N = \frac{V}{Q_n} \dots\dots\dots(2.27b)$$

Keterangan :

N = Jumlah angkur yang dibutuhkan

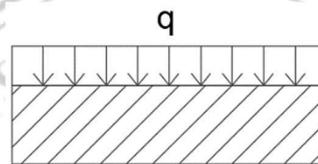
V' = Gaya geser horizontal

Q_n = Kuat geser nominal satu buah angkur konektor (N)

2.10.4.5. Lendutan

Lendutan ditinjau akibat pengaruh beban mati dan beban hidup

- Akibat beban merata



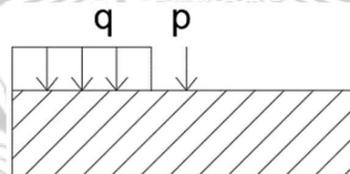
Gambar 2. 16 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

Lendutan akibat pengaruh beban merata

$$\Delta_{\max} = \frac{(DL)-l^4}{384.EI} \dots\dots\dots(2.28a)$$

$$\Delta x = \frac{(DL)-l^2}{24.EI} (l-x)^2 \dots\dots\dots(2.28b)$$

- Akibat beban merata dan beban terpusat ditengah



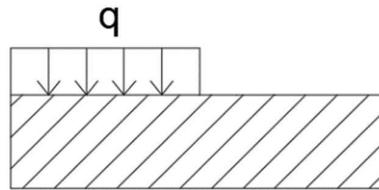
Gambar 2. 17 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata dan Terpusat

Lendutan akibat pengaruh beban merata dan beban terpusat

$$\Delta_{\max} = \frac{Pl^3}{192.EI} \dots\dots\dots(2.28c)$$

$$\Delta x(x < \frac{l}{2}) = \frac{Px^3}{48.EI} (3l-4x) \dots\dots\dots(2.28d)$$

- Akibat beban merata diujung balok kantilever



Gambar 2. 18 Balok Statis Tak Tentu Dengan Beban Merata

$$\Delta_{\max} = \frac{wL^4}{8.EI} \dots\dots\dots(2.28e)$$

$$\Delta x = \frac{w}{24.EI} (x^4 - 4l^3x + 3L^3) \dots\dots\dots(2.28f)$$

- Akibat beban terpusat diujung balok kantilever



Gambar 2. 19 Beban Terpusat di Ujung Balok Kantilever

$$\Delta_{\max} = \frac{pl^3}{3EL} \dots\dots\dots(2.28g)$$

$$\Delta x = \frac{p}{6EI} (2l^3 - 3l^2x - Tx^3) \dots\dots\dots(2.28h)$$

2.10.5. Perencanaan Batang Tarik

Material struktur baja mempunyai kelebihan dalam memikul gaya tarik atau gaya tekan. Mutu bahannya juga relatif tinggi, sehingga dimensi pada struktur cenderung langsing. Untuk struktur seperti itu, pemakaian material baja pada struktur 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 terdiri dari profil Tunggal serta ada profil – profil tersusun.

2.10.5.1. Batas Kelangsingan

Karena mutu material baja relatif tinggi, maka dimensi batang tariknya bisa sangat langsing. Secara teoritis, kondisi kelangsingan hanya diperhitungkan pada elemen tekan, untuk mengantisipasi tekuk. Batang tarik secara teoritis biasanya

tidak mengalami tekuk, oleh karena itu batang tarik tidak dibatasi kelangsingannya, hanya disarankan $L/r \leq 300$ sesuai SNI 1729-2020. Saran didasarkan pengalaman praktis dari segi ekonomis, kemudahan pembuatan, dan resiko rusak yang kecil selama konstruksi. Selain itu juga elemen yang sangat langsing biasanya cenderung bergoyang atau bergetar, Oleh karena itu membuat tidak nyaman bagi penghuninya.

2.10.5.2. Kekuatan Tarik

Kuat tarik rencana $\phi_t P_n$, dengan ϕ_t sebagai faktor ketahanan tarik dan P_n 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:

$$P_n = F_y A_g \dots\dots\dots(2.29a)$$

$\phi_t = 0,9$ terhadap keruntuhan leleh

b. Untuk keruntuhan Tarik pada penampang neto:

$$P_n = F_u A_e \dots\dots\dots(2.29b)$$

$\phi_t = 0,75$ terhadap keruntuhan fraktur

Dimana:

A_g = luas penampang bruto, mm^2

A_e = luas neto efektif, mm^2

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.

$$P_n = F_u A_e = F_u \cdot A_n \cdot U \dots\dots\dots(2.29c)$$

Dimana:

$\phi_t = 0,75$ terhadap keruntuhan fraktur

A_n = luas penampang bersih (netto)

A_e = luas penampang efektif

U = faktor *shear lag*

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

2.10.6. Perencanaan Batang Tekan

Batang tekan dikhususkan pada komponen struktur yang memikul beban tekan sentris tepat di titik berat penampang, atau kolom dengan gaya aksial saja. Namun pada dasarnya, terdapat eksentrisitas oleh ketidaklurusan batang, atau oleh ketidaktepatan pembebanan, juga kekangan dari tumpuannya yang menimbulkan momen.

2.10.6.1. Parameter Batang Tekan

Material sebagai parameter yaitu F_y dan F_u yang akan menentukan kuat batang tarik, tetapi pada batang tekan hanya F_y dan 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), berpengaruh pada 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.

2.10.6.2. Kuat Tekan Nominal

A. Tekuk Lentur

Tekuk lentur terjadi pada penampang tekan yang tidak langsing. Untuk mencegah tekuk lentur maka perlu diketahui berapa nilai kuat tekan nominal. Adapun persamaan untuk mencari kuat tekan nominal adalah :

$$\phi_c P_n \geq P_u \dots\dots\dots(2.30a)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g \dots\dots\dots(2.30b)$$

Adapun persamaan untuk mencari nilai tegangan kritis adalah sebagai berikut :

Jika $\frac{L_c}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{E} \leq 2,25$, maka nilai F_{cr} :

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \dots\dots\dots(2.30c)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \dots\dots\dots(2.30d)$$

Jika $\frac{L_c}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ atau $\frac{F_y}{E} > 2,25$, maka nilai F_{cr} :

$$F_{cr} = 0,877 F_y \dots\dots\dots(2.30e)$$

Dimana :

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

F_{cr} = Tegangan kritis pada batang tekan kondisi tekuk lentur (Mpa)

A_g = Luasan utuh penampang batang tekan (mm²)

ϕ_c = Faktor reduksi kuat tekan (0,90)

F_y = Tegangan leleh minimum (Mpa)

F_e = Tegangan tekuk elastis (Mpa)

B. Tekuk Torsi dan Tekuk Torsi Lentur

Tekuk torsi dan tekuk kombinasi torsi lentur ini dikhususkan untuk penampang tidak langsing yang memiliki struktur asimetris dan simetris tunggal, struktur simetris ganda, struktur silang. Dan juga siku tunggal dengan $b/t > 0,71$

$\sqrt{E/F_y}$. Adapun persamaan untuk mencari kuat tekan nominal adalah sebagai berikut :

$$\phi_c P_n \geq P_u \dots\dots\dots (2.31a)$$

$$P_n = F_{cr} \times A_g \dots\dots\dots (2.31b)$$

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

$$F_{cr} = \left(\frac{F_{cry} + F_{crz}}{2H} \right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{cry} + F_{crz} \cdot H}{(F_{cry} + F_{crz})^2}} \right] \dots\dots\dots (2.31c)$$

Sedangkan untuk mencari nilai tegangan tekuk elastis torsi atau torsi lentur (F_e) dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

- a. Pada struktur simetris tunggal yang mengalami torsi terhadap pusat geser

$$F_e = \left(\frac{\pi^2 EC_w}{L_c z^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{I_x + I_y} \dots\dots\dots (2.31d)$$

- b. Pada struktur simetris tunggal yang mengalami torsi terhadap pusat geser adalah sumbu simetri

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F}{2H} \right) \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey} + F_{ez} \cdot H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right] \dots\dots\dots (2.31e)$$

Dimana,

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

H = konstanta lentur

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

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

2.10.7. Panjang Efektif Kolom

Dalam memprediksi kekuatan kolom terdapat cara sederhana yang efektif yaitu memperhitungkan panjang efektif kolom. Panjang efektif ditentukan dengan mencari korelasi bentuk tekuk yang berkesesuaian dengan konsep *Euler*. Konsep *Euler* adalah konsep dasar dalam mereencanakan struktur tekan. Adapun persamaan

beban tekuk kritis yang dirumuskan oleh *Euler*, dimana faktor Panjang efektif diperhitungkan yaitu :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times EI}{(KL)^2} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana :

E = Modulus elastisitas (Mpa)

I = Inersia penampang (mm⁴)

K = Nilai kekakuan struktur batang tekan (kN/m)

L = Panjang struktur tekan (m)

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 SNI 1729-2020 pasal E2 (*Panjang Efektif*) yaitu :

$$L_c = K \times L \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana :

L_c = Panjang efektif batang tekan (mm)

L = Panjang batang tekan (mm)

K = Faktor panjang efektif

r = Radius girasi (mm)

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

$$\frac{L_c}{r} \leq 200 \dots\dots\dots(2.33a)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots\dots\dots(2.33b)$$

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:

- Rangka tidak bergoyang: $0,5 \leq K \leq 1,0$
- Rangka bergoyang: $1,0 \leq K \leq \infty$

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Bentuk tekuk kolom diperlihatkan sebagai garis putus-putus						
Nilai K teoritis	0,50	0,70	1,00	1,00	2,00	2,00
Rekomendasi nilai K untuk desain jika kondisi ideal hanya berupa pendekatan	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,00
Notasi kondisi ujung	 <ul style="list-style-type: none"> Rotasi dan translasi tertahan (jepit) Rotasi bebas translasi tertahan (sendi) Rotasi tertahan translasi bebas Rotasi dan translasi bebas 					

Gambar 2. 20 Tabel Nilai K

2.10.8. Perencanaan (Balok-Kolom)

Perencanaan (Balok – Kolom) adalah batang portal pada struktur yang elemen batangnya akan menerima kombinasi dari gaya aksial dan momen maka harus direncanakan menggunakan perhitungan batang portal (balok - kolom). Pada dasarnya dalam perencanaan batang portal dapat ditinjau pada kuat tekan dan kuat lenturnya. Dari tinjauan kuat tekan disebabkan ada gaya aksial, dan kuat lentur disebabkan ada gaya lentur. Sehingga nantinya dihubungkan dengan persamaan interaksi antara kuat tekan dan kuat lentur. Berdasarkan SNI 1729-2020 pasal H1 (*Komponen Struktur Simetris Ganda Dan Tunggal Yang Memikul Lentur Dan Gaya Aksial*) yang menyatakan interaksi lentur dan gaya tekan pada struktur simetris

ganda dan komponen struktur simetris tunggal yang melentur terhadap sumbu geometris (x atau y) dibatasi oleh persamaan:

$$\text{Jika } \frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \text{ maka : } \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.34a)$$

$$\text{Jika } \frac{P_r}{P_c} < 0,2 \text{ maka : } \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \dots\dots\dots (2.34b)$$

Dimana :

P_r = Kekuatan aksial perlu (N)

P_c = Kekuatan aksial desain (N)

M_r = Kekuatan lentur perlu (Nmm)

M_c = Kekuatan lentur desain (Nmm)

2.10.9. Sistem Rangka Tebreis Kosentris

Pada Sistem ini untuk *brace*, $\frac{1}{4}$ bagian tengah dari panjang *brace* dan zona yang berdekatan di setiap sambungan yang sama dengan tinggi komponen *brace* (d) pada bidang tekuk. Rasio kelangsingan diagonal breis $L_c / r \leq 200$

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.

Kekuatan tarik breis terekspektasi

$$R_y F_y A_g \dots\dots\dots (2.35a)$$

Dimana:

A_g = luas penampang bruto, in. (mm^2)

Kekuatan pada breis terekspektasi dalam kondisi tekan bisa diambil sebagai nilai terkecil antara

$$R_y F_y A_g \text{ dan } (1/0,877) F_{cr} A_g \dots\dots\dots (2.35b)$$

A. Sambungan Balok – Kolom

Jika breis atau pelat buhul yang disambungkan ke semua komponen pada struktur sambungan balok ke kolom, maka sambungan harus sesuai dengan salah satu syarat sebagai berikut:

- Momen yang berhubungan dengan kekuatan lentur balok terekspektasi, $R_y M_p$, dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan α_s
- Momen yang berhubungan dengan jumlah dari kekuatan lentur kolom terekspektasi,

$$\Sigma (R_y F_y Z) \dots\dots\dots (2.35c)$$

B. Sambungan Breis

Kekuatan perlu pada sambungan breis dalam kondisi tarik, tekan dan lentur (termasuk sambungan balok ke kolom jika merupakan bagian dari sistem rangka trebreis) maka harus ditentukan oleh syarat berikut ini. Kekuatan perlu ini boleh diperhitungkan secara independen tanpa interaksi.

a. Kekuatan Tarik perlu

Kekuatan leleh terekspektasi breis dalam kondisi tarik, ditentukan sebagai:

$$R_y F_y A_g \dots\dots\dots (2.35d)$$

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 α_s .

Sambungan - sambungan breis harus direncanakan sebagai penahan gaya atau rotasi lentur yang muncul akibat tekuk breis. Sambungan-sambungan yang memenuhi salah satu ketentuan berikut ini dianggap memenuhi persyaratan :

1) Kekuatan Lentur Perlu

Sambungan - sambungan pada breis yang direncanakan sebagai penahan gaya lentur yang muncul akibat tekuk breis harus memiliki kekuatan perlu sebesar kekuatan lentur breis terekspektasi dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan α_s . Kekuatan lentur breis terekspektasi harus ditentukan sebagai:

$$R_y M_p \text{ (breis terhadap sumbu tekuk kritis) } \dots\dots\dots (2.35e)$$

2) Kapasitas Rotasi

Sambungan - sambungan breis yang direncanakan sebagai penahan rotasi yang muncul akibat tekuk breis, maka harus memiliki kapasitas rotasi yang cukup sebagai akomodasi untuk rotasi yang diperlukan pada drift antar tingkat desain pada tingkat tersebut. Rotasi inelastis sambungan diperbolehkan

C. 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. $R_y M_p$, dikalikan dengan 1,1 dan dibagi dengan α_s ,

Dimana:

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

Momen yang berhubungan dengan jumlah dari kekuatan lentur kolom terekspektasi,

$$\sum(R_y F_y Z) \cdot 1,1 / \alpha_s \dots\dots\dots (2.35f)$$

Dimana:

F_y = tegangan leleh minimum terspesifikasi, ksi (MPa)

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

α_s = faktor penyesuaian level beban DFBT-DKI = 1,0 (DFBT) dan 1,5 (DKI).

D. 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

$0,6R_yF_y tp/\alpha_s$ dikalikan dengan panjang joint..... (2.35g)

Dimana:

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

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

tp = ketebalan pelat buhul, in. (mm)

2.10.10. Perencanaan Sambungan

Pemilihan untuk jenis dan detail sambungan adalah ciri utama dari suatu perencanaan konstruksi struktur baja, yang jumlahnya sendiri relatif banyak dan bermacam - macam bentuknya. Sistem sambungan untuk struktur baja relatif istimewa jika dibanding dengan struktur beton. Pada umumnya struktur beton tidak mengenal istilah sambungan, dikarenakan biasa digunakan adalah cor ditempat. Sambungan tidak bisa dibuat sekaligus, tetapi dalam bentuk elemen - elemen lepas untuk dirakit agar menjadi sambungan.

2.10.10.1. Sambungan Baut Tipe Geser

Sambungan baut tipe geser harus menggunakan baut dengan mutu yang tinggi, sebab hal ini akan berpengaruh pada kekuatan dan kekakuan sebuah sambungan. Pada perencanaan sambungan yang menggunakan baut, perlu diperhitungkan gaya-gaya yang akan bekerja. Gaya ini yang nantinya akan dipakai sebagai acuan untuk mendapatkan berapa jumlah baut yang diperlukan agar membuat sebuah struktur baja yang aman tetapi tetap ekonomis.

1. Mekanisme slip-kritis baut

Sambungan pada baut mutu tinggi tipe geser dengan mekanisme slip kritis atau disebut sambungan slip-kritis dipilih untuk konstruksi yang didominasi beban dinamik atau beban bolak-balik berganti tanda, yang umum terjadi pada jembatan atau pada mesin industri.

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

$$R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_f \cdot T_b \cdot n_s \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana:

- μ = Koefisien slip rata-rata (0,30 untuk kelas A; 0,50 untuk kelas B)
- D_u = 1 Rasio rata-rata pratarik baut (1,13)
- h_f = Faktor untuk pengisi
 - 1,00 untuk satu pengisi bagian-bagian yang disambung
 - 0,85 untuk lebih dari satu pengisi bagian-bagian yang disambung
- T_b = Gaya tarik minimum, lihat tabel 2.15 (kN)
- n_s = Jumlah slip yang diijinkan
- ϕ = 1,00 untuk lubang ukuran standar dan slot pendek yang tegak lurus terhadap arah beban; 0,85 untuk lubang ukuran berlebih dan slot pendek yang paralel terhadap arah beban; 0,70 untuk lubang slot Panjang.

2. Mekanisme tumpu baut

Kekuatan tumpu (bearing strength) terjadi saat slip kritis mengalami kegagalan, hal ini ditandai dengan terjadinya selip. Kekuatan tumpu adalah pada saat baut menumpu pada profil baja atau pelat sambungan, sehingga diperlukan analisa terhadap profil baja atau pelat sambungan yang menjadi tumpuan. Kekuatan tumpu dipengaruhi oleh posisi dan jarak antar baut. Pada umumnya jumlah baut yang diperlukan relatif lebih sedikit jika dibandingkan dengan menggunakan

mekanisme slip kritis. Berikut adalah persamaan untuk mendapatkan kuat tumpu baut berdasarkan AISC-2010 :

a. Kuat Tumpu Baut

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

$$R_n = 1,2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq \times 2,4 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots \dots \dots (2.37a)$$

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

$$R_n = 1,5 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq \times 3,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots \dots \dots (2.37b)$$

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 terhadap arah gaya, maka kekuatannya berkurang dan dapat dihitung sebagai berikut ini :

$$R_n = 1,0 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq \times 2,0 \cdot d \cdot t \cdot F_u \dots \dots \dots (2.37c)$$

b. Kuat Geser Baut

Jika pelat mengalami fenomena tumpu dan geser, maka pada baut juga demikian. Tetapi karena ukuran baut sudah ditentukan, maka kerusakan akan terjadi lebih dahulu adalah geser. Oleh sebab itu dalam perencanaan yang dievaluasi hanya kuat geser saja, yang relatif lebih lemah dibandingkan kuat tumpunya. Rumus kuat geser baut per 1 bidang geser adalah:

$$R_n = F_{nv} \cdot A_b \dots \dots \dots (2.38)$$

Dimana:

F_{nv} = Tegangan geser nominal baut.

A_b = Luas penampang baut, bagian berulir atau polos, tergantung tegangan geser nominal yang dipakai.

c. Kuat Blok Pelat

Perhitungan kekuatan sambungan tipe geser dengan mekanisme tumpu didasarkan pada sambungan kekuatan individu masing-masing baut sambungan dengan jumlah baut yang relatif kecil. Tetapi untuk sambungan dengan jumlah baut yang relatif banyak, dengan penempatan yang berkelompok, dapat menyebabkan keruntuhan blok dalam satu kesatuan. Rumus kuat blok geser pelat adalah,

$$R_n = 0,6F_u \cdot A_{nv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \leq 0,6F_y \cdot A_{gv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \dots \dots \dots (2.39)$$

Dimana:

F_u = Kuat tarik minimum pelat sambungan (MPa)

F_y = Kuat leleh minimum pelat sambungan (MPa)

A_{nv} = Luas netto (dengan lubang) potongan mengalami gaya geser, yaitu garis batas blok searah gaya (mm²)

A_{gv} = Luas utuh (tanpa lubang) potongan mengalami gaya geser, yaitu garis batas blok searah gaya (mm²)

A_{nt} = Luas netto (dengan lubang) potongan mengalami gaya geser, yaitu garis batas blok tegak lurus gaya (mm²)

U_{bs} = Untuk tegangan tarik merata (uniform) $U_{bs} = 1,0$, dan yang tidak merata (gradien) $U_{bs} = 0,5$. Ini biasa dijumpai misalnya pada sambungan ujung dari balok dengan penempatan kolom baut secara ganda

2.10.10.2. 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 adalah menyambungkan gaya geser pada sambungan lewatan bila ukuran panjang las sudut.

b. Tahanan Nominal

Persyaratan keamanan suatu struktur dalam hal ini adalah terpenuhinya persamaan: $\phi R_{nw} \geq R_u$ (2.40)

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

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

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

Dimana :

ϕ = faktor ketahanan

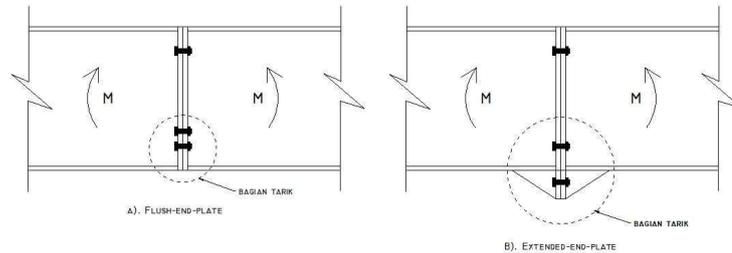
R_{nw} = tahanan nominal per satuan panjang las

R_u = beban terfaktor per satuan panjang las

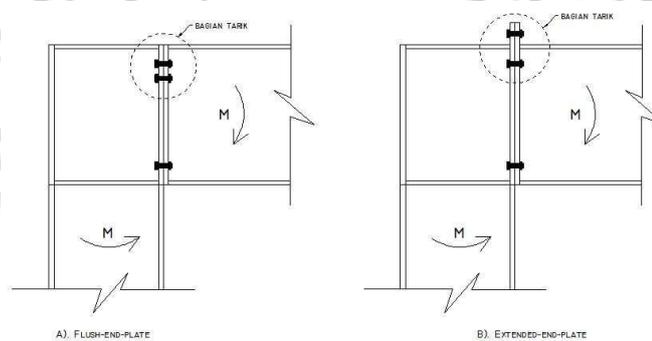
2.10.10.3. Sambungan *End-Plate*

Sambungan baut tipe tarik mempunyai jumlah baut yang lebih sedikit dengan ditambahkan pelat khusus yang dilas pada ujungnya atau sering disebut

dengan sambungan *end plate*. Sambungan *end plate* dapat dipasang untuk balok dengan balok, kolom dengan balok, dan pelat dengan kolom.



Gambar 2. 21 Sambungan *end-plate* pada balok



Gambar 2. 22 Sambungan *end-plate* pada portal

2.10.10.4. 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 :

$$M_f < 2 T_{ub} (d_0 + d_1) \dots \dots \dots (2.41a)$$

$$T_{ub} = A_b \times F_{nt} \dots \dots \dots (2.41b)$$

Keterangan :

M_f = Momen rencana (kNm)

Tub = Gaya tarik yang terjadi (N)

d0 = Jarak baut paling atas dengan sayap profil bagian bawah (mm)

d1 = Jarak baut sayap bagian atas dengan sayap profil bagian bawah (mm)

Ab = Luat baut (mm²)

Fnt = Kuat tarik nominal (Mpa)

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

$$Ab \geq \frac{\frac{2 M_f}{L-dc} + Vg}{3 F_v} \dots\dots\dots(2.41c)$$

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:

$$s = \sqrt{bp \times g} \dots\dots\dots(2.41d)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{M_f}{0,8 F_{yp} \{db - P_i \left[\frac{bp}{2} \left(\frac{1}{p_f} + \frac{1}{s} \right) + (p_f + s) \frac{2}{g} \right] + \frac{bp}{2} \left(\frac{db}{p_f} + \frac{1}{2} \right) \}} \dots\dots\dots(2.41e)$$

Keterangan :

Bp = Lebar pelat sambung (mm)

Fyp = Mutu pelat yang digunakan (Mpa)

db = 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:

$$T_p = \frac{M_f}{1,1 F_{yp} \times b_p (d_b - t_{bf})} \dots\dots\dots(2.41f)$$

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

$$T_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \dots\dots\dots(2.41g)$$

Keterangan :

b_{bf} = Ukuran sayap profil (mm)

t_{bf} = Ukuran tebal profil (mm)

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

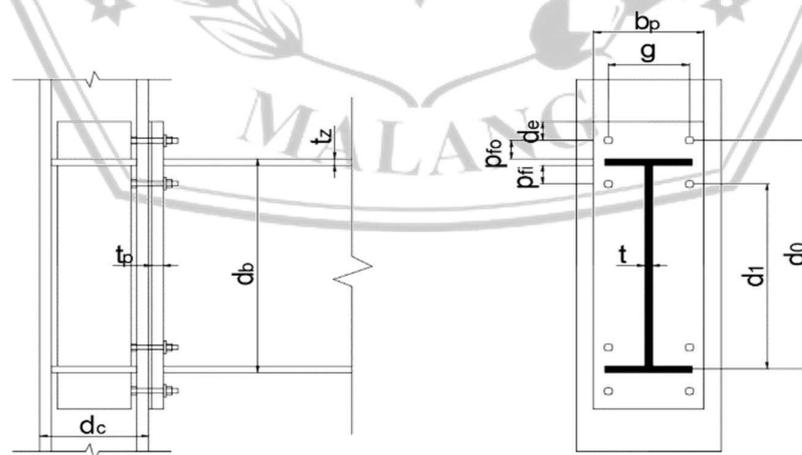
Tetapi jika persamaan diatas tidak terpenuhi, maka tebal pelat pengaku dapat dihitung dengan persamaan:

$$t_2 \geq \frac{d_2 + w_2}{90} \dots\dots\dots(2.41h)$$

Keterangan :

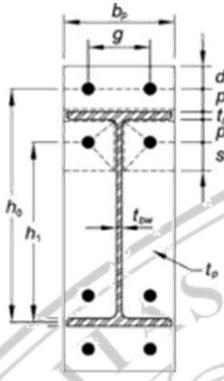
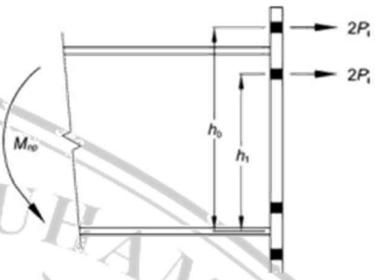
d_2 = Tinggi badan profil (mm)

w_2 = Lebar badan profil (mm)



Gambar 2. 23 Konfigurasi Sambungan BSEP

Tabel 2. 10 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Pelat Ujung Diperpanjang Tanpa Pengaku Dengan Empat Baut

Geometri Pelat-Ujung dan Pola Garis Leleh	Model Gaya Baut
	

$$Y_p = \frac{bp}{2} [h_1(\frac{1}{pfi} + \frac{1}{s}) + h_0(\frac{1}{pfo} - \frac{1}{2}) + \frac{2}{g}[h_1(pfi + s)]] \dots\dots\dots(2.41i)$$

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{bp \times g} \text{ catatan : Jika } pfi > s, \text{ gunakan } pfi = s \dots\dots\dots(2.41j)$$

2. Stiffened End Plate Connection

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

$$Mf = Mpr + Vu \times Sh \dots\dots\dots(2.42a)$$

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

$$Cpr = \frac{fy+f}{2 \times fy} < 1,2 \dots\dots\dots(2.42b)$$

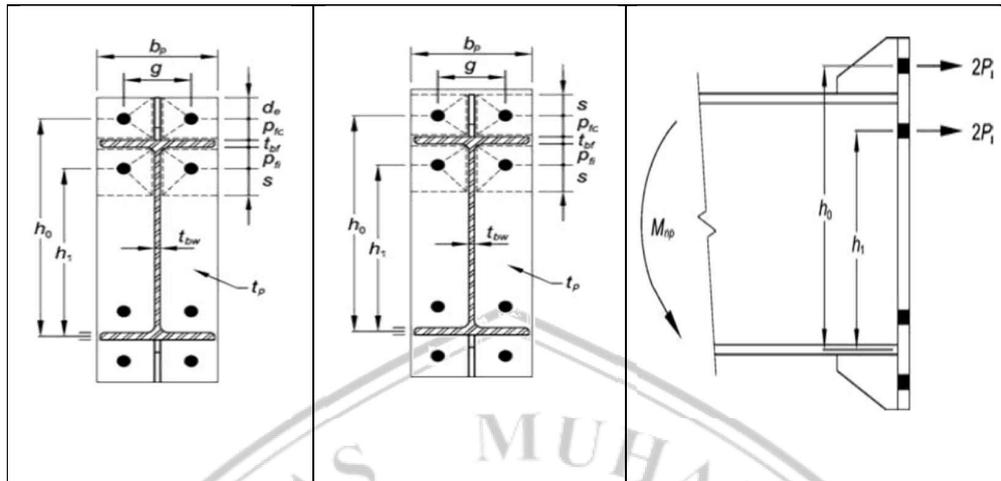
$$Vu = 2 \times \frac{Mpr}{Lh} \dots\dots\dots(2.42c)$$

a. Desain Bagian Balok

Panjang Pelat Pengaku pelat ujung:

$$Lst = \frac{Hst}{\tan 30} \dots\dots\dots(2.42d)$$

$$Sh = tp + Lst$$



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

$$Y_p = \frac{bp}{2} \left[h_s \left(\frac{1}{pfi} + \frac{1}{s} \right) + h_o \left(\frac{1}{pfo} + \frac{1}{2s} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_s(pfi + s) + h_o(d_e + pfo)] \dots\dots\dots(2.42g)$$

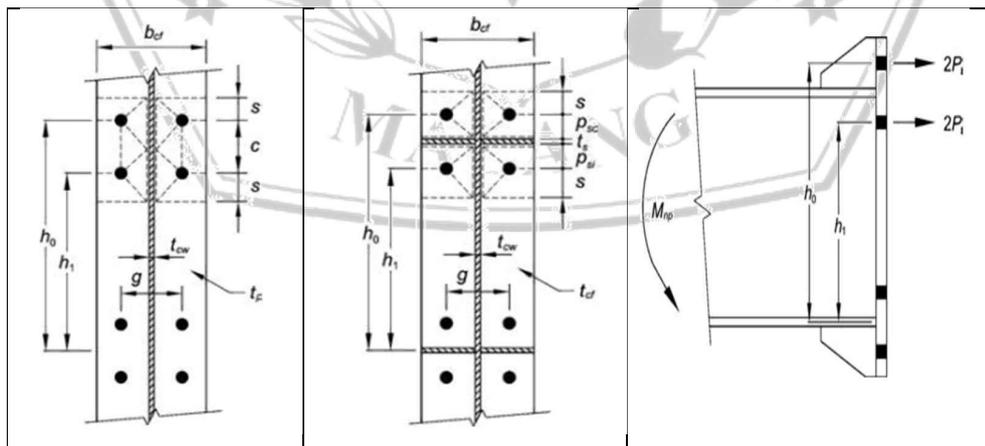
Untuk kasus 2 ($d_e > s$),

$$Y_p = \frac{bp}{2} \left[h_s \left(\frac{1}{pfi} + \frac{1}{s} \right) + h_o \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{pfo} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_s(pfi + s) + h_o(s + pfo)] \dots\dots\dots(2.42g)$$

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{bp \times g} \text{ catatan : Jika } pfi > s, \text{ gunakan } pfi = s$$

b. Desain Bagian Kolom

Tabel 2. 12 Ringkasan Parameter Mekanisme Garis Leleh Sayap Kolom Diperpanjang Dengan Empat Baut



Sayap Kolom Tanpa Pengaku:

$$Y_c = \frac{bcf}{2} \left(h_1 \left(\frac{1}{s} + h_0 \frac{1}{s} \right) + \frac{2}{g} \left(h_1 \left(S + \frac{3c}{4} \right) h_0 + \left(S + \frac{c^2}{4} \right) \right) \right) \frac{2}{g} \dots \dots \dots (2.42h)$$

Sayap Kolom Diperkaku:

$$Y_c = \frac{bcf}{2} \left(h_1 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{psi} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{ps0} \right) \right) + \frac{2}{g} x \left(h_1 x (S + psi) h_0 (S + ps0) \right) \dots \dots \dots (2.42i)$$

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{bp \times g} \text{ catatan : Jika } pfi > s, \text{ gunakan } pfi = s$$

Pemeriksaan Ketebalan Sayap Kolom:

$$t_{cmin} = \sqrt{\frac{1,11Mf}{1 \times f_{yc} \times y_c}} < t_{cf}$$

Pemeriksaan Kuat lentur Sayap kolom tanpa pelat menerus:

$$\phi M_{cf} = \phi d \times F_{yc} \times Y_c \times t_{cf}^2$$

Memeriksa kekuatan pelelehan badan kolom tanpa pelat menerus:

$$\phi R_n = \phi d \times C_t \times (6k_c + t_{bf} + 2t_p) \times F_{yc} \times t_{cw}$$

$$C_t = 1$$

$$\phi d = 1$$

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

Memeriksa kekuatan tekuk badan kolom tanpa pelat menerus

$$F_f u \leq \phi R_n$$

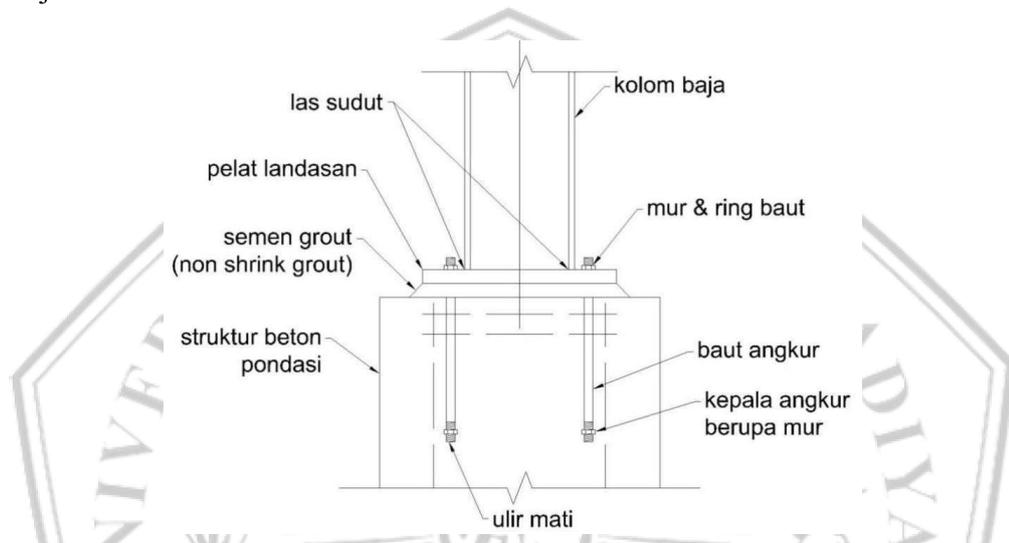
$$R_n = \frac{24 \times t^3 \times \sqrt{E \times f_{yc}}}{h}$$

Memeriksa Lipat Badan Kolom tanpa Plat menerus:

$$R_n = 0,8 \times t^2 \times c_w \left(1 + 3 \times \left(\frac{N}{dc} \right) \times \left(\frac{t_{cw}}{t_{cf}} \right) \times 1,5 \right) \times \sqrt{\frac{E \times f_{yc} \times t_{cf}}{t_{cw}}}$$

2.10.10.5. Sambungan *Base-Plate*

Jenis sambungan *Base plate* pada umumnya terdiri dari pelat landasan dan baut angkur. Adapun pelat landasan tersambung ke kolom baja dengan dilas. Secara teoritis, bisa saja baut angkur tidak diperlukan, tetapi dalam pelaksanaan harus dipasang. Minimal dua buah, untuk mengantisipasi momen tidak terduga yang terjadi selama masa konstruksi.



Gambar 2. 25 Konfigurasi *base plate*

1. Kuat Tumpu Beton

Kuat tumpu rencana yaitu $\phi_c P_p$, dengan $\phi = 0,65$. Adapun kuat tumpu nominal P_p tergantung dari luasan beton tumpuan yang tersedia, sebagai berikut.

- a. Luas beton \cong luas pelat landasan, maka:

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \dots \dots \dots (2.43a)$$

Atau dalam format tegangan tumpu nominal maka

$$f_p(maks) = \phi_c 0,85 \cdot f_c' \dots \dots \dots (2.43b)$$

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

$$P_p = 0,85 \cdot f_c' \cdot A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \cdot A_1 \dots\dots\dots (2.44a)$$

$$f_p(maks) = \phi_c 0,85 \cdot f_c' \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_c' \dots\dots\dots (2.44b)$$

Dimana:

f_c' = Kuat tekan beton (Mpa)

A_1 = Luas beton yang dibebani (mm^2)

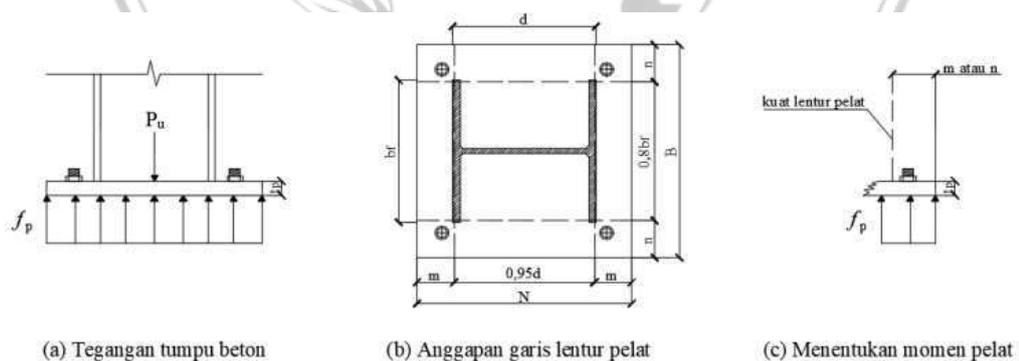
A_2 = Luas bawah piramida terpancung yang luas atas adalah A_1 , dimana sisi miringnya memiliki perbandingan 2:1 untuk rasio horizontal dan vertikal (mm^2)

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

2. Tekan Konsentris

Apabila base plate bertumpu pada permukaan beton (pondasi) maka dimensi pelat landasan ($B \times N$) harus diperhitungkan sesuai ketentuan dibawah ini agar beton dibawahnya tidak mengalami kerusakan.

$$f_p = \frac{P_u}{B \times N} \leq f_p \text{ maks} \dots\dots\dots (2.45a)$$



Gambar 2. 26 base plate terhadap beban tekan konsentris

Kuat perlu pada pelat landasan dapat ditentukan berikut:

$$M_{pl} = \frac{1}{2} f_p \times l^2 \dots\dots\dots (2.45b)$$

dimana l adalah nilai terbesar dari m , n , dan $\lambda n'$.

$$m = \frac{N - 0,95d}{2} \dots\dots\dots (2.45c)$$

$$n = \frac{B - 0,8bf}{2} \dots\dots\dots (2.45d)$$

$$\lambda n' = \frac{1}{4} \lambda \sqrt{d \times bf} \dots\dots\dots (2.45e)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{x}}{1 + \sqrt{1-x}} \leq 1 \dots\dots\dots (2.45f)$$

$$x = \left[\frac{4d \times bf}{(d+bf)^2} \right] \frac{P_u}{\phi_c P_p} \dots\dots\dots (2.45g)$$

Nilai λ dapat diambil = 1. Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_{pl}}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2fp}{\phi F_y}} = 1 \sqrt{\frac{2P_u}{\phi F_y \times B \times N}} \dots\dots\dots (2.45h)$$

Dimana:

ϕ = Faktor ketahanan terhadap lentur, ($\phi = 0,9$)

l = Nilai maksimum dari m , n , dan $\lambda n'$ agar tebal pelat landasannya ekonomis maka parameter tersebut dibuat minimum, salah satunya adalah menetapkan $m = n$

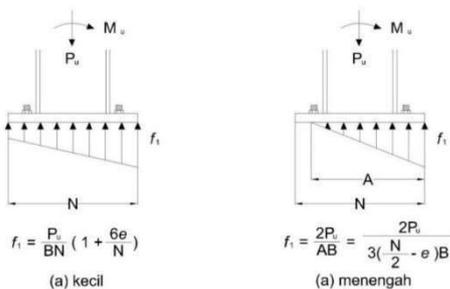
3. Tegangan Beton Segitiga – elastis

a. Momen kecil tanpa ankur

Dalam mencari nilai e ini terdapat dua kondisi, diantaranya:

$$\text{Kecil, jika } e = \frac{Mu}{P_u} \leq \frac{N}{6} \dots\dots\dots (2.46a)$$

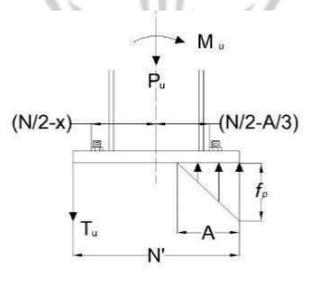
$$\text{Menengah, jika } \frac{N}{6} \leq e \leq \frac{N}{2} \dots\dots\dots (2.46b)$$



Gambar 2. 27 Distribusi tegangan segitiga akibat eksentrisitas kecil

b. Momen besar dengan angkur

Apabila nilai e relatif lebih besar, yang akan terjadi adalah *base-plate* dapat mengalami guling. Untuk menghindari hal tersebut maka diperlukan baut angkur yang sebagai penahan akibat guling.



Gambar 2. 28 Distribusi tegangan segitiga akibat eksentrisitas besar

Nilai T_u dan A dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$T_u + P_u = \frac{1}{2} f_p \times A \times B \dots\dots\dots (2.47a)$$

$$P_u \left(\frac{N}{2} - x \right) + M_u = \frac{1}{2} f_p x A x B \left(N - x - \frac{A}{3} \right) \dots\dots\dots (2.47b)$$

jika $A' = \frac{N}{2} - x$ dan $f' = f_p x B \frac{N-x}{2}$, dari persamaan diatas didapatkan:

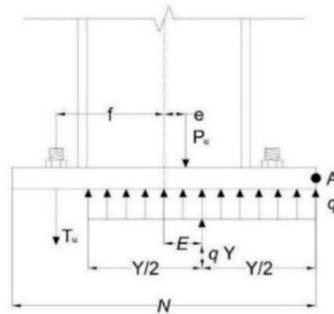
$$A = \frac{f' \pm \sqrt{f'^2 x f_p x B (P_u A' + M_u)}}{\frac{1}{2} f_p x B} \dots\dots\dots (2.47c)$$

Nilai $A \leq N'$, jika tidak memenuhi maka ukuran pelat landas tidak mencukupi, perlu ukuran lain. Gaya tarik baut angkur adalah:

$$T_u = \frac{1}{2} f_p \times A \times B - P_u \dots\dots\dots (2.47d)$$

4. Tegangan Beton Persegi

a. Momen Kecil tanpa Angkur



Gambar 2. 29 Distribusi tegangan persegi akibat eksentrisitas kecil

Pada perencanaan ini diasumsikan distribusi tegangan berbentuk persegi.

$$q_{maks} = f_p maks \times B \dots\dots\dots (2.48a)$$

$$y_{min} = \frac{P_u}{q_{maks}} \dots\dots\dots (2.48b)$$

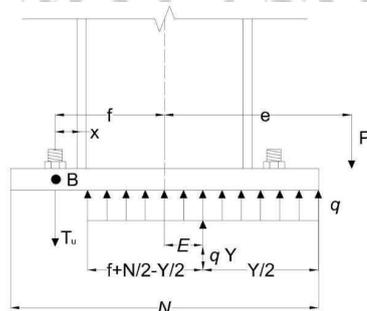
jika ϵ jarak resultan tumpu beton terhadap pusat berat kolom:

$$\epsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{y_{min}}{2} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2q_{maks}} \dots\dots\dots (2.48c)$$

$$e_{kritis} = \epsilon_{maks} = \frac{N}{2} - \frac{P_u}{2q_{maks}} \dots\dots\dots (2.48d)$$

eksentrisitas beban $\leq e_{kritis}$ maka baut angkur tidak diperlukan.

b. Momen Besar dengan Angkur



Gambar 2. 30 Distribusi tegangan persegi akibat eksentrisitas besar

Jika $e = M_u + P_u > e_{kritis}$ maka diperlukan baut angkur untuk mencegah *base plate* mengalami punter.

Untuk mencari nilai T_u dan Y , dipergunakan persamaan keseimbangan gaya vertikal sebagai berikut :

$$T_u + P_u = qY \dots\dots\dots (2.49a)$$

Juga keseimbangan momen terhadap titik B :

$$Q_{maks} Y \left(\frac{N}{2} - \frac{Y}{2} + f \right) - P_u (e + f) = 0 \dots\dots\dots (2.49b)$$

Setelah pengaturan diperoleh persamaan kuadrat berikut :

$$Y^2 - 2 \left(\frac{N}{2} + f \right) Y + \frac{2P_u(e+f)}{q_{maks}} = 0 \dots\dots\dots (2.49c)$$

dan penyelesaian untuk Y adalah :

$$Y = \left(\frac{N}{2} + f \right) \pm \sqrt{\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 - \frac{2P_u(e+f)}{q_{maks}}} \dots\dots\dots (2.49d)$$

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

$$\left(\frac{N}{2} + f \right)^2 \geq \frac{2P_u(e+f)}{q_{maks}} \dots\dots\dots (2.49e)$$

Gaya pada angkur adalah

$$T_u = qY - P_u \dots\dots\dots (2.49f)$$

Untuk kondisi batas leleh, tebal minimum pelat landasan adalah

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4M_p l}{\phi F_y}} \dots\dots\dots (2.49g)$$

Pada sisi desak : momen terjadi akibat tegangan reaksi beton pada kantilever m dari tumpuannya. Jika $Y \geq m$ maka :

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4(\frac{1}{2} f_p m^2)}{0,90 F_y}} = 1,5 m \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \dots \dots \dots (2.49h)$$

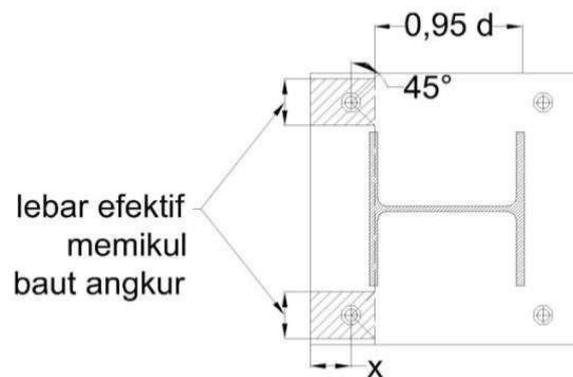
Untuk $Y < m$ maka :

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4F_p Y(m-\frac{Y}{2})}{0,90 F_y}} = 2,11 m \sqrt{\frac{F_p Y(m-\frac{Y}{2})}{F_y}} \dots \dots \dots (2.49i)$$

Dimana :

$$f_p = \frac{Pu}{BY}$$

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. 31 Lebar efektif pelat pemikul baut angkur

Tebal pelat landasan minimum untuk memikul baut angkur adalah.

$$t_p \geq \sqrt{\frac{4Mpl}{\phi F_y}} = \sqrt{\frac{4(\frac{T_u}{nb} \times \frac{a}{2a})}{0,90 F_y}} = 1,5 m \sqrt{\frac{T_u}{nb f_y}} \dots \dots \dots (2.49j)$$

Dimana:

nb = Jumlah baut angkur yang dipasang

2.10.10.6. 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:

$$\phi R_b = \phi f_u \cdot 2,4 \cdot d_b \cdot t_{fb} \geq \phi R_n \dots\dots\dots (2.50a)$$

Dimana :

ϕR_n = adalah geser baut (kips), d_b adalah diameter baut (in),

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

F_u = adalah tegangan Tarik baja struktur (kips) $\phi = 0,75$

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

Kondisi leleh:

$$R_n = 0,9 \cdot A_g \cdot F_y \dots\dots\dots (2.50b)$$

Kondisi fraktur:

$$R_n = 0,75 \cdot f_u \cdot A_e \dots\dots\dots (2.50c)$$

Kedua nilai (ϕR_n tersebut harus lebih besar dari P_{uf})

Pelat Sambung (*gusset plate*)

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

Apabila, $F_u \cdot A_{nt} > 0,6 \cdot F_u \cdot A_{ns}$ maka,

$$\phi R_n = \phi (F_u \cdot A_{nt} + 0,6 \cdot F_y \cdot A_{gs}) \dots\dots\dots (2.50d)$$

Apabila, $0,6 \cdot F_u \cdot A_{ns} > F_u \cdot A_{nt}$ maka,

$$\phi R_n = \phi(0,6 \cdot F_u \cdot A_n + f_y \cdot A_g) \dots\dots\dots(2.50e)$$

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

$$\phi R_n = \phi F_y \cdot A_w \dots\dots\dots(2.50f)$$

Kontrol kuat desain baut terhadap geser dan tarik dengan persamaan

$$\phi R_n = \phi \cdot 2,4 \cdot d_t \cdot F_u > \phi R_n \dots\dots\dots(2.50g)$$

