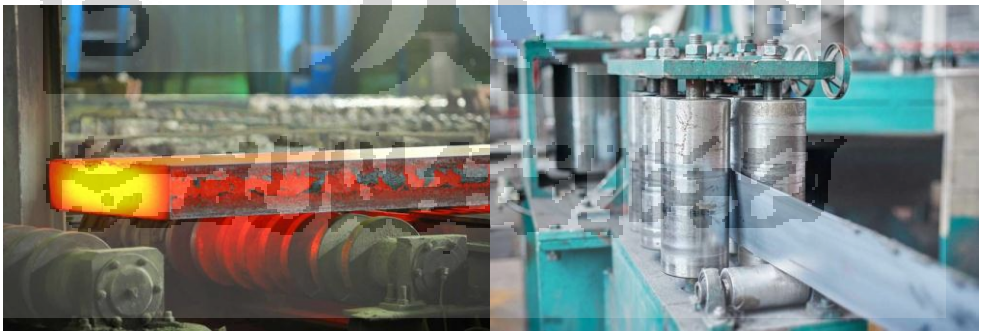
BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Material Baja

Baja merupakan logam campuran yang terdiri dari besi (Fe) dan karbon (C). Berbeda dengan besi (Fe), alumunium (Al), seng (Zn), tembaga (Cu), dan titanium (Ti) yang merupakan logam murni. Dalam senyawa antara besi dan karbon (unsur non logam) tersebut besi menjadi unsur yang lebih dominan disbanding karbon. Kandungan karbon berkisar antara 0,2-2,1% dari berat baja, tergantung tingkatannya. Fungsi karbon adalah untuk meningkatkan kwalitas baja, yaitu daya tariknya dan tingkat kekerasannya.

3.2 Baja *Hot-Rolled* dan *Cold-Rolled*

Proses *hot-rolled* atau canai panas diperlukan untuk merubah baja hasil peleburan logam menjadi bentuk profil atau pelat. Adapun proses *cold-rolled* atau canai dingin adalah proses lanjutan untuk menghasilkan baja mutu lebih tinggi, lebih halus dan presisi, sehingga penampilan visualnya jauh lebih baik. Berikut adalah gambar proses pembuatan baja *hot-rolled* dan *cold-rolled*, dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.

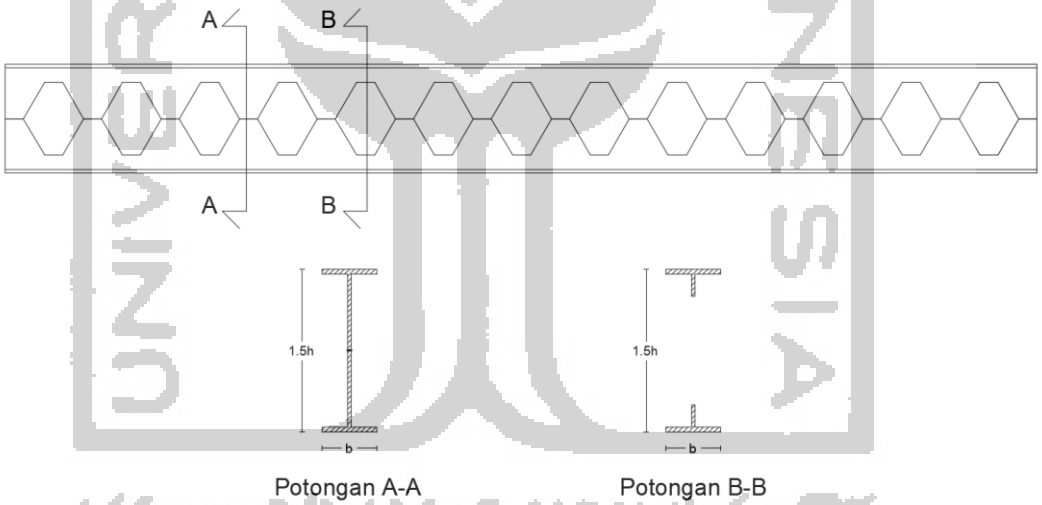


Gambar 3.1 Proses Pembuatan Baja *Hot-Rolled* (kiri) dan *Cold-Rolled* (kanan)

(Sumber: *reliance-foundry*.com, 2017)

3.3 Baja *Castellated Beam*

Baja *castellated* atau *honeycomb* adalah balok baja yang memiliki elemen pelat badan yang berlubang, baja *castellated* dibentuk dengan cara membelah bagian tengah dari profil *I-beam, H-beam* atau *wide flange* dengan membentuk pola zig-zag, kemudian bagian atas dari profil yang telah dipotong dipisahkan kemudian digeser sedikit ke samping kemudian disambungkan kembali lalu dilas, sehingga terbentuk suatu profil baru dengan tinggi kurang lebih 1,5 kali dari tinggi profil aslinya dan memiliki bukaan berlubang berbentuk segienam (*hexagonal*). Dengan penambahan tinggi tersebut baja *castellated beam* memiliki kekakuan yg lebih tinggi dari profil aslinya, dikarenakan penambahan tinggi di bagian badan, membuat nilai inersia dari penampang profil *casttela* bertambah sehingga membuat profil tersebut menjadi lebih kaku. Berikut adalah gambar baja *castellated beam.*

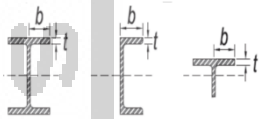
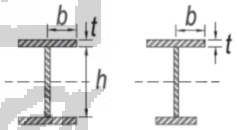


Gambar 3.2 Baja *Castellated Beam*

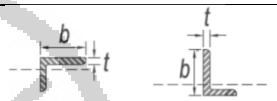
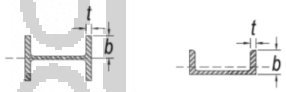
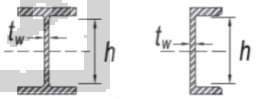
3.4 Rasio Lebar-Tebal dan Klasifikasi Penampang

Klasifikasi penampang balok diperluka untuk membedakan perilakunya dalam memikul momen sampai kondisi inelastisnya, klasifikasi elemen balok dibagi menjadi tiga, yaitu penampang kompak, penampang non-kompak, dan penampang langsing. Dengan cara yang sederhana dan efektif, dimana rasio lebar terhadap tebal (b/t) menunjukan kelangsingan elemen pelat sayap dan badan. Yang kemudian dievaluasi berdasarkan kondisi *restraint*-nya. Berikut adalah tabel rasio tebal terhadap lebar elemen tekan komponen struktur menahan lentur, dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini.

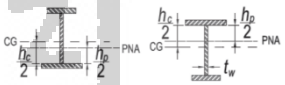
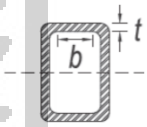
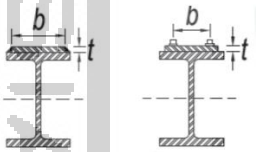
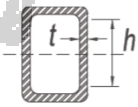
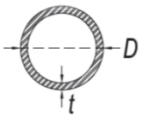
Tabel 3.1 Rasio Tebal Terhadap Lebar Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Deskripsi Elemen	Rasio Ketebalan Terhadap Lebar	Batasan Rasio Tebal-Lebafr		Contoh
		λ_p (kompak)	λ_r (non-kompak)	
Sayap dari profil I canai panas, kanal, dan T	*b/t*	$0{,}38\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$1{,}0\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
Sayap dari profil tersusun bentuk I simetris ganda dan tunggal	*b/t*	$0{,}38\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$0{,}95\sqrt{\frac{kcE}{FL}}$	

Lanjutan Tabel 3.1 Rasio Tebal Terhadap Lebar Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Deskripsi Elemen	Rasio Ketebalan Terhadap Lebar	Batasan Rasio Tebal-Lebafr		Contoh
		λ_p (kompak)	λ_r (non-kompak)	
Kaki dari siku tunggal	*b/t*	$0{,}54\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$0{,}91\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
Sayap dari semua profil I dan kanal dalam lentur pada sumbu lemah	*b/t*	$0{,}38\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$1{,}0\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
Badan dari T	*d/t*	$0{,}84\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$1{,}03\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
Badan dari profil I simetris ganda dan kanal	h/t_w	$3{,}76\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$5{,}7\sqrt{\frac{E}{Fy}}$	

Lanjutan Tabel 3.1 Rasio Tebal Terhadap Lebar Elemen Tekan Komponen Struktur Menahan Lentur

Deskripsi Elemen	Rasio Ketebalan Terhadap Lebar	Batasan Rasio Tebal-Lebafr		Contoh
		λ_p (kompak)	λ_r (non-kompak)	
Badan dari profil I simetris tunggal	h_c/t_w	$\dfrac{\frac{hc}{hp}\sqrt{\frac{E}{Fy}}}{\left(0{,}54\frac{Mp}{My}-0{,}09\right)^2} \leq \lambda r$	$5{,}7\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	
Sayap dari PSB persegi dan boks ketebalan merata	b/t	$1{,}12\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	$1{,}4\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	
Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara deretan sarana penyambung atau las	b/t	$1{,}12\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	$1{,}4\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	
Badan dari PSB persegi dan boks	h/t	$2{,}42\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	$5{,}70\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$	
PSB bulat	D/t	$0{,}07\dfrac{E}{Fy}$	$0{,}31\dfrac{E}{Fy}$	

(Sumber: SNI 1729:2015)

3.4.1 Penampang Kompak

Penampang kompak merupakan konfigurasi geometri penampang yang paling efisien dalam memanfaatkan material. Karena kemampuan profil kompak mencapai momen plastis, perilaku keruntuhannya bersifat daktail, sehingga menjadi syarat penting bangunan tahan gempa. Dimana syarat penampang kompak adalah nilai $\lambda < \lambda_p$.

3.4.2 Penampang Non-Kompak

Penampang non-kompak mempunyai efisiensi satu tingkat lebih kecil dibandingkan penampang kompak dan ketika dibebani seat tepi terluarnya dapat mencapai tegangan leleh, meskipun demikian sebelum penampang plastis penuh terbentuk, profil akan mengalami tekuk lokal terlebih dahulu. Oleh karena itu kapasitas momen yang dapat diandalkan pada penampang ini adalah $M_y < M_p$. Dimana syarat penampang non-kompak adalah $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$.

3.4.3 Penampang Langsing

Penampang langsing adalah konfigurasi profil yang tidak efisien ditinjau dari segi pemakaian material. Jadi saat dibebani sebelum tegangan mencapai kondisi leleh telah terjadi tekuk lokal terlebih dahulu. Oleh karena itu keruntuhannya ditentukan oleh tekuk, yang sifatnya tidak daktail. Kapasitas momen penampangnya adalah $M < M_y$. syarat penampang langsing adalah $\lambda_r > \lambda$.

3.5 Komponen Struktur Profil I Kompak Melentur Di Sumbu Major

Ketentuan ini berlaku untuk profil kompak, I-simetri-ganda, debebani pada sumbu kuat dan melalui pusat geser. Pada ketentuan ini, kuat lentur nominal penampang M_n diambil dari nilai terkecil yang dihasilkan kondisi batas material leleh (momen plastis) dan tekuk torsi lateral.

3.5.1 Material Leleh (Momen Plastis)

$$M_n = M_p = F_y Z_x \tag{3.1}$$

Keterangan:

M_n = Kuat Lentur Nominal Balok (Nmm).

M_p = Momen Lentur Penampang Plastis (Nmm).

F_y = Kuat Leleh Baja (MPa).

Z_x = Modulus Plastis Penampang Terhadap Sumbu Kuat (mm^3).

3.5.2 Kapasitas Momen

1. Bentang Pendek

   Jika L_b adalah jarak pertambatan lateral yang dipasang pada balok, maka untuk $L_b \leq L_p$, maka kuat momen nominal terhadap momen lentur adalah:

$$M_n = M_p \tag{3.2}$$

   Dengan mencari L_p (jarak pertambatan lateral maksimum) untuk menghindari tekuk torsi lateral (LTB) sebelum penampang plastis terbentuk sempurna, maka Lp dapat dihitung sebagai berikut:

$$L_p = 1{,}76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{3.3}$$

   Keterangan:

   E = Modulus elastisitas baja (MPa).

   F_y = Kuat leleh Baja (MPa).

   r_y = Radius girasi balok terhadap sumbu lemah.

   Radius girasi atau jari-jari girasi adalah jarak yang menunjukan distribusi massa atau area dari benda tersebut. Radius girasi merupakan fungsi dari momen inersia. Jika sebuah benda ber-momen inersia dan ber-massa yang terdistribusi secara merata pada lingkaran berjari-jari di sekitar titik pusatnya.

$$r_y = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{3.4}$$

Keterangan:

r_y = Radius Girasi.

I = Momen Inersia (mm^4).

A = Luas Penampang (mm^2).

2. Bentang Menengah

Untuk komponen balok dengan $L_p \leq L_b \leq L_r$, maka kuat momen lentur nominal terhadap momen lentur adalah:

$$M_n = C_b\left(M_p - \left(M_p - 0{,}7F_yS_x\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right) \leq M_p \tag{3.5}$$

Keterangan:

M_n = Kuat lentur nominal (Nmm).

M_p =Momen lentur penampang plastis (Nmm).

C_b = Faktor modifikasi tekuk torsi lateral untuk momen gradien.

F_y = Kuat leleh baja (MPa).

S_x = Modulus penampang elastis pada sumbu x (mm^3).

L_b = Jarak pertambatan lateral (mm).

Lp = Panjang batas plastis (mm).

L_r = Panjang batas inelastis (mm).

Untuk faktor C_b atau faktor modifikasi tekuk torsi lateral untuk momen gradien bila kedua ujung segmen memiliki pengaku dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$C_b = \frac{12{,}5M_{Maks}}{2{,}5M_{Maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_c} \tag{3.6}$$

Keterangan:

M_{Maks} = Nilai mutlak dari momen maksimum sepanjang bentang (Nmm).

M_A = Nilai mutlak dari momen di seperempat bentang (Nmm).

M_B = Nilai mutlak dari momen di setengah bentang (Nmm).

M_c = Nilai mutlak dari momen di tiga-perempat bentang (Nmm).

Pembatasan Panjang L_r ditentukan sebagai berikut:

$$L_r = 1{,}95 r_{ts} \frac{E}{0{,}7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6{,}67\left(\frac{0{,}7F_y}{E}\right)^2}} \tag{3.7}$$

Keterangan:

L_r = Batas panjang in-elastis (mm).

r_{ts} = Radius girasi efektif (mm).

J = Konstanta torsi (mm^4).

S_x = Modulus elastisitas penampang (mm^3).

h_o = Jarak antar titik berat elemen sayap (mm).

Dimana koefisien c untuk profil I simetris ganda adalah

$$c = 1 \tag{3.8}$$

Untuk profil I simetris ganda dengan sayap persegi, nilai konstanta pembengkokan (C_w) dan konstanta torsi (J) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$C_w = \frac{I_y h_o^2}{4} \tag{3.9}$$

$$J = \frac{1}{2}\left(2t_f^3 b + t_w^3 h\right) \tag{3.10}$$

Dikarenakan menggunakan profil I simetris ganda maka nilai radius girasi efektif (r_{ts}) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$r_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} \tag{3.11}$$

Keterangan:

h = Tinggi badan profil (mm).

t_w = Tebal badan profil (mm).

b_f = Lebar sayap profil (mm).

t_f = Tebal sayap profil (mm).

3. Bentang Panjang

Untuk komponen balok dengan $L_r \leq L_b$, maka kuat momen lentur nominal terhadap momen lentur adalah:

$$M_n = M_{cr} \leq M_p \tag{3.12}$$

Keterangan:

M_n = Kuat lentur nominal balok (Nmm).

M_{cr} = Momen kritis pada balok (Nmm).

M_p = Momen lentur penampang plastis (Nmm).

Dimana nilai M_{cr} dapat ditentukan sebagai berikut:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \tag{3.13}$$

Keterangan:

C_b = Faktor modifikasi tekuk torsi lateral untuk momen gradien.

L_b = Jarak pertambatan lateral (mm).

E = Modulus elastisitas baja (MPa).

I_y = Momen Inersia arah y (mm^4).

J = Konstanta torsi (mm^4).

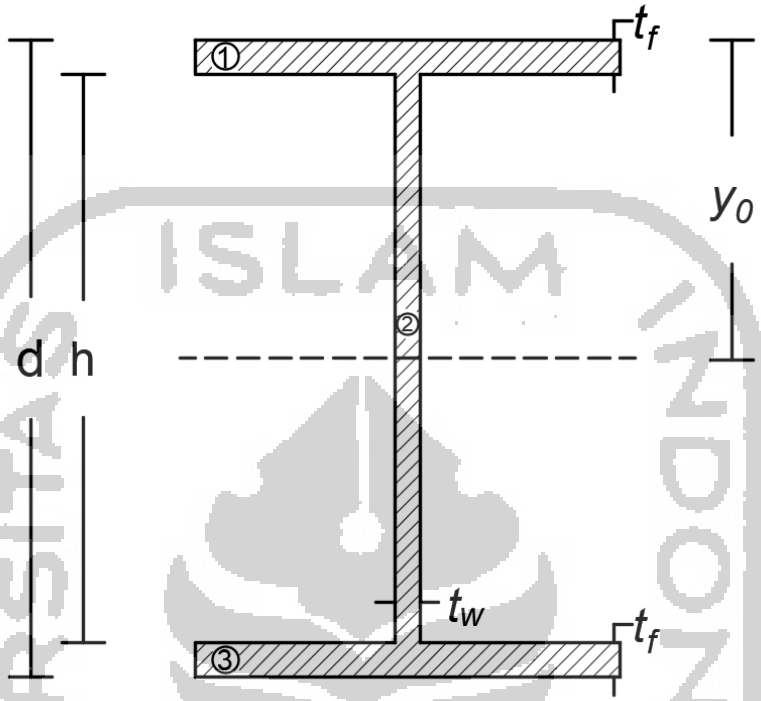
G = Modulus elastisitas geser baja (77.200 MPa).

C_w = Konstanta pembengkokan (mm^6).

3.6 Momen Inersia Penampang

Pada SNI-1729:2015, persamaan panjang plastis (L_p) dipengaruhi dengan adanya nilai radius girasi (r_y) yang dapat mempengaruhi besarnya nilai L_p. sedangkan nilai r_y sendiri dipengaruhi dengan adanya nilai Inerisa penampang. Sehingga semakin besar nilai inersia maka besarnya nilai r_y akan bertambah dan mampu memperbesar nilai L_p. Berikut adalah cara menentukan nilai inersia.

3.6.1 Penampang I Dimensi 150x100x6x8



Gambar 3.3 Penampang I Utuh

Pada penampang ini nilai inersia dicari dengan cara membagi penampang di atas menjadi tiga bagian, yaitu bagian sayap atas, badan, dan sayap bawah. Maka momen inersianya adalah:

$$I_{x1} = \frac{1}{12} \times b \times t_f^3 \tag{3.14}$$

$$I_{x2} = \frac{1}{12} \times t_w \times h^3 \tag{3.15}$$

$$I_{x3} = \frac{1}{12} \times b \times t_f^3 \tag{3.16}$$

Dari hasil perhitungan inersia tiap elemen diatas, maka didapatkan nilai inersia penampang sebagai berikut:

$$I_{xx} = \sum I_x \times A(\Delta y)^2 \tag{3.17}$$

Keterangan:

I_{xx} = Momen inersia penampang I (mm^4).

I_{x1} = Momen inersia pada elemen sayap bagian atas (mm^4).

I_{x2} = Momen inersia pada elemen badan (mm^4).

I_{x3} = Momen inersia pada elemen sayap bagian bawah (mm^4).

t_f = Tebal sayap (mm).

t_w = Tebal badan (mm).

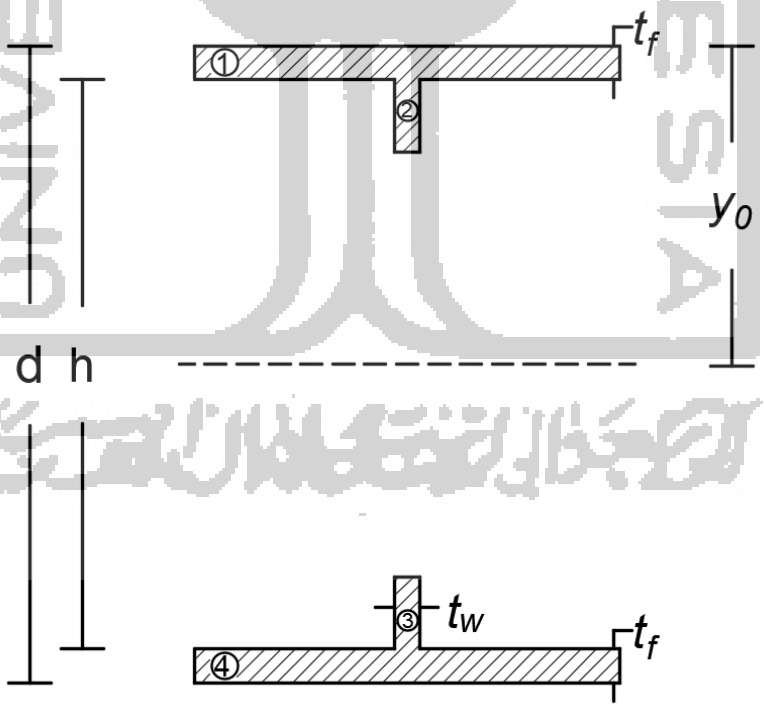
b = Lebar penampang (mm).

h = Tinggi badan penampang (mm).

A = Luas penampang (mm^2).

Δy = Selisih titik berat elemen dengan titik berat penampang (mm).

3.6.2 Penampang I Berlubang



Gambar 3.4 Penampang I Berlubang

Pada penampang ini nilai inersia dicari dengan cara membagi penampang di atas menjadi lima bagian, yaitu bagian sayap atas, badan atas, lubang, badan bawah, dan sayap bawah. Maka momen inersianya adalah:

$$I_{x1} = \frac{1}{12} \times b \times t_f^3 \tag{3.18}$$

$$I_{x2} = \frac{1}{12} \times t_w \times h^3 \tag{3.19}$$

Karena penampang diatas merupakan penampang simetris ganda, maka

$$I_{x3} = I_{x2} \tag{3.20}$$

$$I_{x4} = I_{x1} \tag{3.21}$$

Dari hasil perhitungan inersia tiap elemen diatas, maka didapatkan nilai inersia penampang sebagai berikut:

$$I_{xx} = \sum I_x \times A(\Delta y)^2 \tag{3.22}$$

Keterangan:

I_{xx} = Momen inersia penampang (mm^4).

I_{x1} = Momen inersia pada elemen sayap bagian atas (mm^4).

I_{x2} = Momen inersia pada elemen badan bagian atas (mm^4).

I_{x3} = Momen inersia pada elemen badan bagian bawah (mm^4).

I_{x4} = Momen inersia pada elemen sayap bagian bawah (mm^4).

t_f = Tebal sayap (mm).

t_w = Tebal badan (mm).

b = Lebar penampang (mm).

h = Tinggi badan penampang (mm).

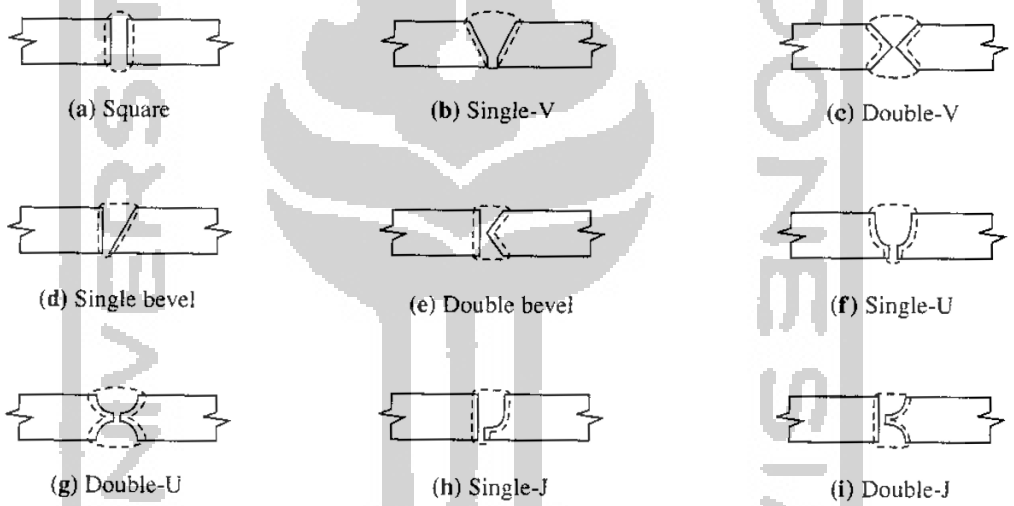
h' = Tinggi badan penampang yang berlubang (mm).

A = Luas penampang (mm^2).

Δy = Selisih titik berat elemen dengan titik berat penampang (mm).

3.7 Las Tumpul (*Groove Welds*)

Penggunaan utama las tumpul (*groove welds*) adalah untuk menyambungkan dua elemen struktur yang sejajar dalam bidang yang sama. Karena las tumpul (*groove weld*) bertujuan untuk mengirim beban penuh dari elemen yang mereka gabungkan, maka kekuatan las-nya harus sama dengan bidang yang di gabungkan. Lasan tumpul ini dikenal sebagai las tumpul penetrasi joint lengkap (*complete joint penetration groove weld*) (Charles G. Salmon dan John E. Johnson, 1996). Berikut adalah gambar beberapa jenis dari las tumpul, dapat dilihat pada gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3.5 Jenis-jenis Las Tumpul (*Groove Weld*)

(Sumber: Charles G. Salmon dan John E. Johnson, 1995)

Berikut adalah Tabel yang menjelaskan tentang kekuatan tersedia dari joint yang telah di-las.

Tabel 3.2 Kekuatan Tersedia Dari Joint yang Telah Di-Las

Tipe beban dan arah relatif ke sumbu las	Logam yang bersangkutan	Ø dan Ω	Tegangan nominal (F_{nBM} atau F_{nw}) (MPa)	Luas efektif (A_{BM} atau A_{we}) (mm^2)	Tingkat kekuatan logam pengisi yang disyaratkan
LAS TUMPUL PENETRASI JOINT LENGKAP					
Tarik tegak lurus sumbu las.	Kekuatan joint ditentukan oleh logam dasar				Logam pengisi yang sesuai harus digunakan. Untuk joint T dan sudut dengan pendukung yang ditinggal, diperlukan logam pengisi takik keras
Tekan tegak lurus sumbu las.	Kekuatan joint ditentukan oleh logam dasar				Logam pengisi dengan tigkat kekuatan yang sama atau satu tingkat di bawah kekuatan logam pengisi yang sesuai
Tarik atau tekan sejajar sumbu las	Tarik atau tekan pada bagian yang tersambung sejajar las tidak perlu diperhitungkan dalam desain las-las yang menghubungkan bagian-bagian tersebut				Logam pengisi dengan tingkat kekuatan yang sama atau kurang dari kekuatan logam pengisi yang sesuai
Geser	Kekuatan jint ditentukan melalui logam dasar				Logam pengisi yang sesuai harus digunakan

(Sumber: SNI 1729:2015)

1. Tegangan pada bagian las tumpul berdasarkan kekuatan elektroda.

$$\phi R_{nw} = 0{,}8 t_e (0{,}6 F_{EXX}) \quad (3.23)$$

Keterangan:

ϕR_{nw} = Tahanan nominal pada bagian las (N/mm).

t_e = Tebal efektif (mm).

F_{EXX} = Tegangan tarik untuk elektroda Kobe E7016 LB-52U (N/mm^2).

2. Tegangan pada bagian las tumpul berdasarkan kekuatan baja.

$$\phi R_{nw} = 0{,}9 t_e (0{,}6 F_y) \quad (3.24)$$

Keterangan:

ϕR_{nw} = Tahanan nominal pada bagian las (N/mm).

t_e = Tebal efektif (mm).

F_y = Tegangan leleh baja (N/mm^2).