

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1. Sifat Mekanis Baja Struktural

Menurut SNI 03-1729-2002, tegangan leleh ( $f_y$ ) dan tegangan tarik ( $f_u$ ) harus memenuhi syarat-syarat mutu yang ada. Nilai-nilai tegangan leleh ( $f_y$ ) dan tegangan tarik ( $f_u$ ) yang akan digunakan untuk perencanaan tidak boleh melebihi dari nilai yang telah diberikan dalam tabel sifat mekanis baja struktural pada SNI 03-1729-2002.

Tabel 3.1 Sifat Mekanis Baja Struktural (SNI 03-1729-2002 tabel 5.3)

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, $f_u$ (MPa)	Tegangan leleh minimum, $f_y$ (MPa)	Peregangan minimum
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 5.1.3, sifat mekanis lainnya dalam baja struktural untuk maksud perencanaan sebagai berikut:

Modulus elastisitas	: $E = 200.000$ MPa
Modulus geser	: $G = 80.000$ MPa
Nisbah poisson	: $\mu = 0,3$
Koefisien pemuaian	: $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ /°C

#### 3.2. Perencanaan Struktur Lentur

##### 3.2.1. Lentur terhadap sumbu kuat

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, suatu komponen perencanaan struktur baja yang memikul lentur terhadap sumbu kuat (sumbu- $x$ ) harus memenuhi persyaratan:

$$M_{ux} \leq \phi M_n \quad (3-1)$$

**Keterangan:**

$M_{ux}$  adalah momen lentur terfaktor terhadap sumbu-x

$\phi$  adalah faktor reduksi = 0,9

$M_n$  adalah kuat lentur nominal penampang terhadap sumbu-x

### 3.2.2. Lentur terhadap sumbu lemah

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, suatu komponen perencanaan struktur baja yang memikul lentur terhadap sumbu lemah (sumbu-y) harus memenuhi persyaratan:

$$M_{uy} \leq \phi M_n \quad (3-2)$$

**Keterangan:**

$M_{uy}$  adalah momen lentur perlu terhadap sumbu-y

$M_n$  adalah kuat lentur nominal penampang terhadap sumbu-y

### 3.3. Klasifikasi Bentuk Penampang

Tabel 3.2 Parameter Lebar Terhadap Ketebalan Penampang

Elemen	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Sayap	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Badan	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

**Keterangan:**

$\lambda$  adalah rasio lebar terhadap ketebalan penampang

$\lambda_p$  adalah batas atas untuk penampang kompak

$\lambda_r$  adalah batas atas untuk penampang tak kompak

### 3.3.1. Penampang kompak

Tentukan rasio lebar terhadap ketebalan penampang berdasarkan tabel 3.2, apabila memenuhi persyaratan  $\lambda \leq \lambda_p$  untuk kedua elemen sayap dan badan, maka penampang tersebut dikategorikan sebagai penampang kompak. (Segui, 2013)

Kuat lentur nominal untuk penampang kompak dipengaruhi oleh  $L_b$ ,  $L_p$ , dan  $L_r$ . Nilai  $L_b$ ,  $L_p$ , dan  $L_r$  dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_0}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (3-3)$$

Dimana:

$$J = I_x + I_y \quad (3-4)$$

$$r_{ts} = \left(\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-5)$$

Keterangan:

- $E$  adalah modulus elastisitas
- $J$  adalah konstanta torsional (in<sup>4</sup>)
- $c = 1,0$  untuk penampang I simetris ganda
- $S_x$  adalah modulus elastis sumbu kuat (arah x)
- $h_0$  adalah jarak titik tengah antar sayap =  $d - t_f$
- $F_y$  adalah tegangan leleh
- $I_y$  adalah momen inersia terhadap sumbu lemah (arah y)
- $C_w$  adalah konstanta kelengkungan (in<sup>6</sup>)
- $L_b$  adalah jarak antar titik dukung lateral

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3-6)$$

Setelah didapatkan nilai  $L_b$ ,  $L_p$ , dan  $L_r$ , Maka kuat lentur nominal penampang kompak dapat dihitung dengan rumus:

3.3.1.1. Momen nominal penampang kompak untuk  $L_b \leq L_p$ 

$$M_n = F_y Z_x \quad (3-7)$$

Keterangan:

$M_n$  adalah momen nominal  
 $F_y$  adalah tegangan leleh  
 $Z_x$  adalah modulus plastis arah x

3.3.1.2. Momen nominal penampang kompak untuk  $L_p < L_b \leq L_r$ 

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3-8)$$

Keterangan:

$C_b$  faktor untuk memperhitungkan kuat lentur yang tidak seragam pada *unbraced length* ( $L_b$ )  
 $F_y$  adalah tegangan leleh  
 $S_x$  adalah modulus elastis sumbu kuat (arah x)

3.3.1.3. Momen nominal penampang kompak untuk  $L_b > L_r$ 

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3-9)$$

Dimana:

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b / r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{Jc}{S_x h_0} \left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (3-10)$$

Keterangan:

$J$  adalah konstanta torsional  
 $C_b$  faktor untuk memperhitungkan kuat lentur yang tidak seragam pada *unbraced length* ( $L_b$ )  
 $c = 1,0$  untuk penampang I simetris ganda  
 $S_x$  adalah modulus elastis sumbu kuat (arah x)  
 $h_0$  adalah jarak titik tengah antar sayap =  $d - t_f$   
 $E$  adalah modulus elastisitas

### 3.3.2. Penampang tak kompak

Nilai momen nominal untuk penampang tak kompak dibagi menjadi 2 berdasarkan tekuk lokal pada bagian sayap dan tekuk putar lateral:

#### 3.3.2.1. Tekuk lokal pada bagian sayap

Jika  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$  maka nilai momen nominal penampang tak kompak adalah:

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (3-11)$$

Keterangan:

$\lambda$	adalah rasio lebar terhadap ketebalan penampang
$\lambda_p$	adalah batas atas untuk penampang kompak
$\lambda_r$	adalah batas atas untuk penampang tak kompak
$S_x$	adalah modulus elastis sumbu kuat (arah x)
$F_y$	adalah tegangan leleh
$M_n$	adalah momen nominal
$M_p$	adalah momen plastis

#### 3.3.2.2. Tekuk lokal lateral

Jika  $L_p < L_b \leq L_r$  maka nilai momen nominal penampang tak kompak adalah:

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3-12)$$

### 3.3.3. Penampang langsing

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, untuk penampang-penampang yang memenuhi  $\lambda_r \leq \lambda$ , kuat lentur nominal penampang ditentukan sebagai berikut:

$$M_n = M_r \left( \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 \quad (3-13)$$

Keterangan:

$M_n$	adalah momen nominal
$M_r$	adalah

### 3.4. Perhitungan Torsi Menggunakan Kunci Torsi

Berdasarkan buku Pedoman Pemasangan Baut Jembatan (2015), pengencangan baut pada umumnya memberikan torsi pada mur atau kepala baut. Hubungan torsi terhadap gaya pratarik baut adalah linier, sehingga nilai dari kunci torsi dapat digunakan untuk mengukur gaya tarik baut.

$$T = \frac{KF_i d}{1000} \quad (3-14)$$

Keterangan:

$T$	adalah nilai torsi (Nmm)
$K$	adalah konstanta friksi antara baut dan mur
$F_i$	adalah gaya tarik baut (N)
$d$	adalah diameter baut (mm)

Nilai konstanta friksi antara baut dan mur ( $K$ ) tergantung pada material dan ukuran baut. Nilai  $K$  dapat dicari dengan melakukan pengujian menggunakan mesin. Apabila tidak terdapat data, maka nilai  $K$  dapat menggunakan nilai pada tabel berikut:

Tabel 3.3 Nilai Konstanta Friksi Antara Baut dan Mur

Material Baut	Nilai K
Baut baja dengan karbon rendah/ <i>Mild steel bolts</i>	0,2
Baut baja hitam tanpa lapisan/ <i>Non-plated black finish steel bolts</i>	0,3
Baut baja dengan lapisan seng/ <i>Zinc plated steel bolts</i>	0,16 – 0,2
Baut baja diberi pelumas/ <i>Lubricated steel bolts</i>	0,18
Baut baja dengan lapisan cadmium/ <i>Cadmium plated steel bolts</i>	0,16

### 3.5. Sifat Mekanik Baut

Sebagai salah satu bagian dari material baja, baut memiliki sifat mekanik yaitu tegangan leleh dan tegangan tarik putus. Berdasarkan buku Pedoman Pemasangan Baut Jembatan (2015) yang merujuk pada standar ASTM, standar ISO, dan standar JIS, maka sifat mekanik baut meliputi:

Tabel 3.4 Sifat Mekanik Baut

	<b>A325</b>	<b>Grade 8.8</b>	<b>A490</b>	<b>Grade 10.9</b>	<b>F10T</b>
Tegangan leleh (MPa)	660	640 (1) 660 (2)	940	940	900
Tegangan tarik putus (MPa)	830	800 (1) 830 (2)	1040- 1210	1040	1000-1200
Tegangan proof load (MPa)	600	580 (1) 600 (2)	830	830	-

Catatan: (1) Diameter baut  $\leq$  M16

(2) Diameter baut  $>$ M16

### 3.6. Kekuatan Baut

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, suatu baut yang memikul gaya terfaktor,  $R_u$ , harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$R_u \leq \phi R_n \quad (3-15)$$

### 3.7. Kuat Geser Baut

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, kuat geser rencana dari satu baut dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$V_d = \phi_f r_1 f_u^b A_b \quad (3-16)$$

Keterangan:

$r_1 = 0,5$

$r_1 = 0,4$

$\phi_f = 0,75$

$f_u^b$

$A_b$

untuk baut tanpa ulir pada bidang geser

untuk baut dengan ulir pada bidang geser

adalah faktor reduksi kekuatan untuk fraktur

adalah tegangan tarik putus baut

adalah luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

### 3.8. Baut Yang Memikul Gaya Tarik

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, kuat tarik rencana satu baut dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$T_d = \phi_f T_n = 0,75 f_u^b A_b \quad (3-17)$$

Keterangan:

$\phi_f = 0,75$  adalah faktor reduksi kekuatan untuk fraktur  
 $f_u^b$  adalah tegangan tarik putus baut  
 $A_b$  adalah luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

### **3.9. Baut Pada Sambungan Tipe Tumpu Yang Memikul Kombinasi Geser**

#### **Dan Tarik**

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, baut yang memikul kombinasi geser terfaktor ( $V_u$ ) dan gaya tarik terfaktor ( $T_u$ ) secara bersamaan harus memenuhi kedua persyaratan berikut ini:

$$f_{uv} = \frac{f_u}{n A_b} \leq r_1 \phi_f f_u^b m \quad (3-18)$$

$$T_d = \phi_f T_n = \phi_f f_b A_b \geq \frac{T_u}{n} \quad (3-19)$$

$$f_t \leq f_1 - r_2 f_{uv} \leq f_2 \quad (3-20)$$

Keterangan:

$\phi_f = 0,75$  adalah faktor reduksi kekuatan untuk fraktur  
 $n$  adalah jumlah baut  
 $m$  adalah jumlah bidang geser

Untuk baut mutu tinggi:

$$f_1 = 807 \text{ MPa}, f_2 = 621 \text{ MPa}$$

$r_2 = 1,9$  untuk baut dengan ulir pada bidang geser

$r_2 = 1,5$  untuk baut tanpa ulir pada bidang geser

Untuk mutu baut normal:

$$f_1 = 410 \text{ MPa}, f_2 = 310 \text{ MPa}$$

$$r_2 = 1,9$$



### 3.10. End Plate Connections

Berdasarkan pada prosedur yang terdapat pada LRFD dan rumus pada ASD. Pada dasarnya rumus pada LRFD dan ASD adalah sama, namun perbedaannya dapat dilihat melalui proses. (Segui, 2013) Berikut ini merupakan penjelasan dari langkah-langkah perencanaan *End Plate Connections*:

1. Menentukan kekuatan momen dari sambungan tersebut setidaknya 60% dari kekuatan momen pada balok.
2. Tentukan ukuran pelat sambungan dengan mencoba-coba ukuran pelat yang ada. Tentukan tebal pelat dan letak baut yang berhubungan dengan sayap balok.
3. Tentukan diameter baut. Saat mengalami kegagalan, baut-baut tersebut diasumsikan sudah mencapai gaya tarik ultimit dari baut tersebut dan memiliki kekuatan sebagai berikut:

$$P_t = F_t A_b \quad (3-21)$$

Keterangan:

$F_t$  adalah gaya tarik ultimit pada baut

$A_b$  adalah luasan baut

Asumsikan kedua sambungan penahan momen tersebut terbentuk oleh gaya-gaya tersebut ( $P_t$ ) dan gaya tekan pada bagian bawah sayap balok.

$$\begin{aligned} M_u &= \phi(2P_t h_0 + 2P_t h_1) \\ &= \phi 2P_t (h_0 + h_1) \\ &= \phi 2F_t A_b (h_0 + h_1) \end{aligned} \quad (3-22)$$

$$M_u = \phi 2F_t \left( \frac{\pi d_b^2}{4} \right) (h_0 + h_1) \quad (3-23)$$

**Keterangan:** $M_u$  adalah momen ultimit $h_0$  adalah jarak dari tengah sayap pada balok tekan sampai ke tengah bagian luar baris pada baut bidang tekan. $h_1$  adalah jarak dari tengah sayap bidang tekan sampai ke baris bagian dalam dari baut. $\phi = 0,75$ 

## 3.10.1. Diameter baut

Untuk menentukan diameter baut gunakan rumus:

$$d_b = \sqrt{\frac{2M_u}{\pi\phi F_t(h_0 + h_1)}} \quad (3-24)$$

**Keterangan:** $d_b$  adalah diameter baut $M_u$  adalah momen ultimit $F_t$  adalah gaya tarik putus baut $h_0$  adalah $h_1$  adalah $\phi = 0,75$ 

## 3.10.2. Momen nominal aktual

Nilai momen nominal aktual ditentukan dengan rumus:

$$\phi M_n = \phi [2P_t(h_0 + h_1)] \quad (3-25)$$

Dimana:

 $\phi = 0,75$ 

## 3.10.3. Tebal pelat

Kuat desain untuk kuat lentur luluh pelat ditentukan dengan rumus:

$$\phi_b F_y t_p^2 Y_p \quad (3-26)$$

**Keterangan:** $\phi_b = 0,9$  $t_p$  adalah tebal pelat $Y_p$  adalah garis luluh

### 3.10.4. Gaya geser pelat

Untuk menentukan gaya pada sayap balok gunakan rumus:

$$F_{fu} = \frac{M_u}{d - t_{fb}} \quad (3-27)$$

Keterangan:

$F_{fu}$  adalah gaya sayap balok

$d$  adalah diameter baut

$M_u$  adalah momen ultimit

$t_{fb}$  adalah tebal sayap balok

Setengah dari gaya pada sayap balok akan menimbulkan gaya geser pelat pada sisi sayap. Hal tersebut akan mengakibatkan geser pada luasan kotor pada pelat dan luasan bersih pada pelat. Untuk kedua kasus tersebut periksa dengan rumus:

$$\frac{F_{fu}}{2} \geq \phi R_n \quad (3-28)$$

Untuk luluh geser:

$$\phi = 0,9 \quad (3-29)$$

$$R_n = (0,6F_y)A_g$$

$$A_g = t_p b_p \quad (3-30)$$

Keterangan:

$t_p$  adalah panjang pelat

$b_p$  adalah tebal pelat

Untuk putus geser:

$$\phi = 0,75 \quad (3-31)$$

$$R_n = (0,6F_u)A_n$$

$$A_n = t_p [b_p - 2 \left( d_b + \frac{1}{8} \right)] \quad (3-32)$$

### 3.10.5. Gaya geser baut dan kuat pikul baut

Reaksi total balok harus ditahan dengan empat baut pada bidang tekan

$$V_u \leq \phi R_n \quad (3-33)$$

Keterangan:

$V_u$  adalah gaya geser ujung

Untuk mengetahui gaya geser baut digunakan rumus:

$$\phi = 0,75$$

$$R_n = F_{nv} \times A_b \times 4 \text{ baut} \quad (3-34)$$

Untuk kuat pikul baut:

$$\phi = 0,75$$

$$R_n = 1,2L_c t F_u \leq 2,4d_b t F_u \quad (\text{per baut}) \quad (3-35)$$

Keterangan:

$t$  adalah ketebalan *end plate connection* atau sayap kolom

$F_u$  adalah gaya tarik ultimit dari *end plate connection* atau sayap kolom

Untuk empat baut digunakan rumus:

$$R_n = 2R_{n1} + 2R_{n2} \quad (3-36)$$

Keterangan:

$R_{n1}$  adalah nilai  $R_n$  pada baut bagian dalam

$R_{n2}$  adalah nilai  $R_n$  pada baut bagian luar