

Analisis Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja Tipe Pelat Sayap Berbaut (PSB) dan T Ganda

Noek Sulandari^{1*}, Yosafat Aji Pranata¹, Anang Kristianto¹

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung¹

Koresponden*, Email: noek.sulandari@eng.maranatha.edu

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	20 Januari 2023	<i>Design of steel structure connections is very important to realize the planned performance of the structures. SNI 7972:2020 specifies prequalified connections for steel moment frames for seismic applications. Bolted Flange Plate (BFP) and Double-Tee connections are non-patented bolt connections. The analysis of both types was carried out by also considering the provisions in SNI 7860:2020 and SNI 1729:2020 to obtain the advantages of each type for decision making purposes. BFP type produces a relatively smaller bolt diameter with more numbers. Attention must be paid to the length limit of the bolt group which does not exceed the depth of the beam. The need of connecting plates dimension is not difficult. Welding connection of plate to column must be carried out in the workshop. Double-Tee connection analysis produces a larger bolt diameter with less amount. The thing that needs attention is the fulfillment of the Tee dimension which is obtained from the cut of hot-rolled structural steel.</i>
Diperbaiki	16 November 2023	
Disetujui	30 November 2023	

Keywords: prequalified connections, bolted flange plate (BFP) connection, double-tee connection.

Abstrak

Desain sambungan struktur baja sangat penting untuk mewujudkan kinerja yang direncanakan. SNI 7972:2020 menentukan sambungan terpraktualifikasi untuk rangka momen pada aplikasi beban seismik. Tipe Pelat Sayap Berbaut (PSB) dan T Ganda merupakan sambungan non hak paten dengan penggunaan baut. Analisis kedua tipe dilakukan dengan memperhatikan pula ketentuan pada SNI 7860:2020 dan SNI 1729:2020 untuk memperoleh kelebihan masing-masing tipe yang dapat menjadi pertimbangan dalam pengambilan keputusan. Tipe PSB menghasilkan diameter baut yang relatif lebih kecil dengan jumlah lebih banyak. Perlu diperhatikan batasan panjang kelompok baut tidak melebihi ukuran tinggi balok. Kebutuhan dimensi pelat penyambung yang bervariasi, tidak menjadi kesulitan karena diperoleh dari pelat baja. Las penyambung pelat ke sayap kolom harus dilaksanakan di bengkel. Analisis sambungan T Ganda menghasilkan diameter baut yang lebih besar dengan jumlah baut lebih sedikit. Tidak ada pembatasan panjang kelompok baut. Hal yang perlu diperhatikan adalah tersedianya dimensi Stab T yang harus dari profil *hot-rolled* yang dipotong.

Kata kunci: sambungan terpraktualifikasi, sambungan Pelat Sayap Berbaut (PSB), sambungan T Ganda.

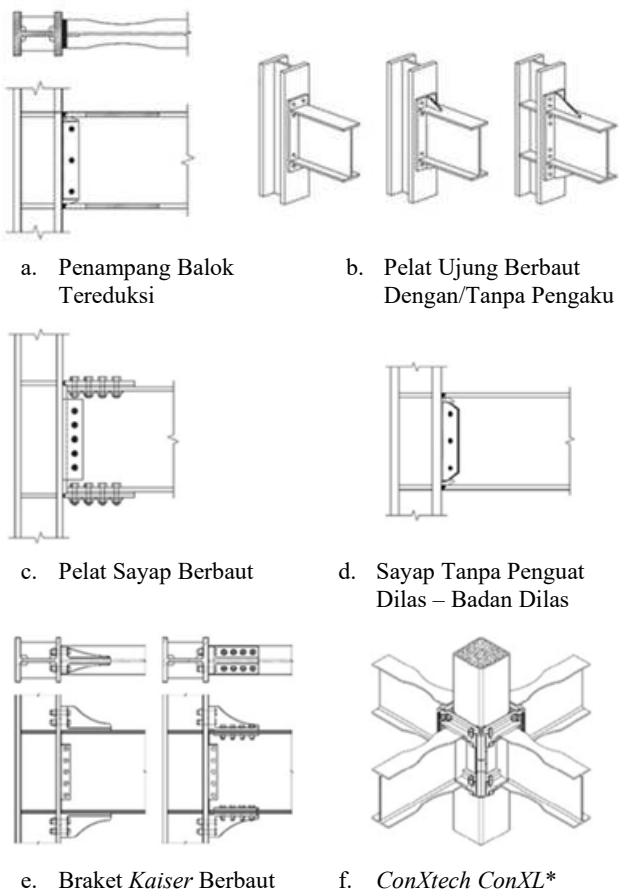
1. Pendahuluan

Bulan Juli 2020, telah ditetapkan pembaruan 3 (tiga) standar terkait perencanaan bangunan baja, yaitu: SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, SNI 7860:2020 tentang Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, dan SNI 7972:2020 tentang Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik.

Ketentuan dalam SNI 1729:2020 adalah dasar untuk perencanaan struktur baja dengan penekanan lebih terhadap beban gravitasi. Penetapan pembaruan bersamaan dengan SNI 7860:2020 dan SNI 7972:2020 menjadikan satu rangkaian ketentuan untuk perencanaan bangunan baja tahan gempa termasuk tata cara penyambungannya. Hal ini sejalan dengan kebutuhan Indonesia sebagai negara yang rawan gempa baik gempa tektonik maupun gempa vulkanik dikarenakan kondisi geografisnya.

Sistem rangka momen (*moment-frame system*) sebagai salah satu sistem struktur rangka baja yang umum digunakan pada bangunan gedung bertingkat, memiliki elemen-elemen utama balok dan kolom disertai batang-batang pengaku (*bracing*) serta elemen lainnya yang melengkapi untuk mewujudkan stabilitas struktur. Peran sambungan balok ke kolom menjadi sangat penting [1]. Urgensi ini tercermin dengan diaturnya secara terpisah melalui SNI 7972:2020 yang merupakan pembaruan SNI 7972:2013 tentang Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik.

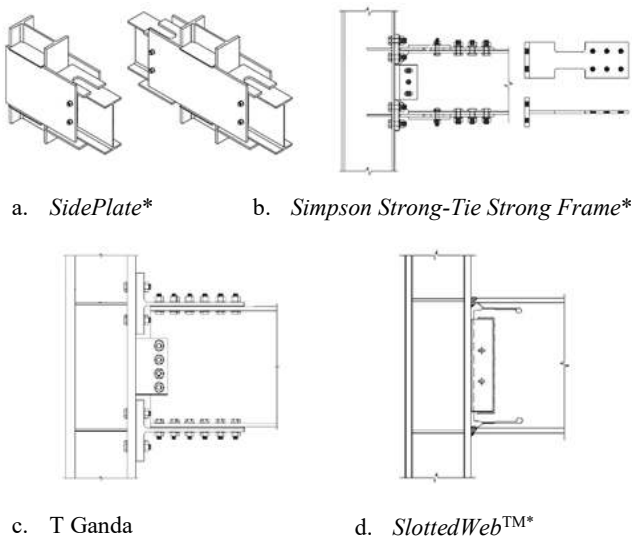
SNI 7972:2013 menetapkan 6 (enam) tipe sambungan terpraktualifikasi, yang dapat dilihat pada **Gambar 1**. Pada pembaruan SNI 7972:2020 ditambahkan 4 (empat) tipe baru seperti pada **Gambar 2**, sehingga total terdapat 10 (sepuluh) tipe sambungan terpraktualifikasi dengan 5 (lima) tipe diantaranya memiliki hak paten.



Keterangan:

(*) dengan hak paten

Gambar 1. Enam Tipe Sambungan Momen Terpraktualifikasi pada SNI 7972:2013



Keterangan:

(*) dengan hak paten

Gambar 2. Penambahan Empat Tipe Sambungan Momen Terpraktualifikasi pada SNI 7972:2020

Dari 10 (sepuluh) tipe sambungan terpraktualifikasi, Pelat Sayap Berbaut (PSB) pada **Gambar 1c** dan T Ganda pada **Gambar 2c** merupakan sambungan non hak paten yang mengutamakan alat penyambung baut [2] [3]. Sampai saat ini, baut masih sangat handal untuk perakitan struktur baja di lapangan, karena pelaksanaan dan pengawasan yang relatif lebih mudah dibandingkan las dimana untuk sambungan elemen utama struktur direkomendasikan dilaksanakan di bengkel dengan fasilitas yang mendukung dan mudah dilakukan pengawasan pada prosedur dan hasil kerjanya [4].

Dalam perencanaan sambungan terpraktualifikasi tipe PSB dan T Ganda [5][6], sangat banyak ketentuan yang harus diperhatikan, seperti:

- a. batasan praktualifikasi spesifikasi komponen yang disambung, baut dan pelat penyambung [5] [6];
- b. batasan profil sebagai Sistem Penahan Gaya Seismik (STGS) [7] [8];
- c. batasan konfigurasi/jarak-jarak baut [9] [10].

Setelah batasan terpenuhi, akan diikuti prosedur desain melalui langkah perhitungan yang cukup panjang [5] [6].

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis sambungan terpraktualifikasi tipe PSB dan T Ganda sebagai sambungan non hak paten yang mengutamakan penggunaan baut untuk memperoleh gambaran kelebihan masing-masing tipe yang dapat menjadi pertimbangan dalam pengambilan keputusan tipe sambungan yang akan dipilih.

2. Metode

Secara garis besar penelitian melalui 4 (empat) tahapan: diawali dengan tahap pemeriksaan pemenuhan batas praktualifikasi sebagai komponen Sistem Penahan Gaya Seismik (STGS), meliputi spesifikasi material komponen struktur yang akan disambung dan penyambungannya (baut dan pelat) serta dimensi profil yang akan dianalisis dan dibandingkan hasilnya; tahap analisis sambungan terpraktualifikasi tipe PSB; tahap analisis sambungan terpraktualifikasi tipe T Ganda dan tahap simpulan dan pemberian saran.

Pada tahap pemeriksaan profil, digunakan profil IWF-*hot-rolled* produk dari salah satu industri baja nasional. Batasan STGS untuk balok dengan asumsi tidak bekerja beban aksial tekan mengikuti persamaan 1 sampai 6 [7] [8].

a. Rasio lebar/tebal sayap balok IWF: $\lambda_f = \frac{b_b}{2t_{fb}}$ (1)

Komponen daktail menengah: $\lambda_{md} = 0,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (2)

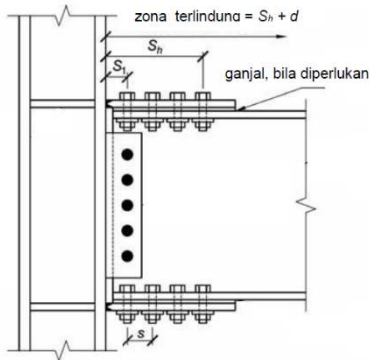
Komponen daktail tinggi: $\lambda_{nd} = 0,32 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (3)

b. Rasio lebar/tebal badan balok IWF: $\lambda_w = \frac{h}{t_{wb}}$ (4)

Komponen daktail menengah: $\lambda_{md} = 3,96 \sqrt{E/R_y F_y}$ (5)

Komponen daktail tinggi: $\lambda_{hd} = 2,57 \sqrt{E/R_y F_y}$ (6)

Sambungan terpraktualifikasi tipe PSB seperti pada **Error! Reference source not found.** memanfaatkan pelat yang dibaut ke sayap balok dan dilas ke sayap kolom.



Gambar 3. Sambungan Terpraktualifikasi Tipe PSB

Analisis mengikuti tahapan berikut [5] [6] [12]:

- a. Hitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis (M_{pr}):

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_x \quad (7)$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2 F_y} \leq 1,2 \quad (8)$$

$$Z_x = A y \quad (9)$$

- b. Hitung diameter baut geser maksimum (d_{vb}) untuk mencegah keruntuhan tarik sayap balok:

$$d_{vb} \leq \frac{b_f}{2} \left(1 - \frac{R_y F_{yb}}{R_t F_{ub}} \right) - 3mm \quad (10)$$

- c. Tentukan kuat geser nominal (R_n) tiap baut yang menentukan.

Kondisi batas geser baut:

$$R_n = 1,0 A_b F_{nv} \quad (11)$$

Kondisi batas tumpu sayap balok:

$$R_n = 2,4 d_b t_f F_{ub} \quad (12)$$

Kondisi batas tumpu pelat penyambung:

$$R_n = 2,4 d_b t_p F_{up} \quad (13)$$

- d. Perkiraan kebutuhan jumlah baut geser, n :

$$n \geq \frac{1,25 M_{pr}}{\phi_n R_n (d + t_p)} \quad (14)$$

- e. Tentukan lokasi sendi plastis (S_h) diukur dari muka kolom:

$$S_h = S_1 + L_{vb} \quad (15)$$

Panjang penyaluran gaya:

$$L_{vb} = \left(\frac{1}{2} n - 1 \right) S \quad (16)$$

S_1 : jarak muka kolom ke baut geser pertama.

S : jarak antar baut geser.

- f. Hitung gaya geser pada lokasi sendi plastis balok (V_h):

$$\phi_v V_n = \phi_v 0,6 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (17)$$

V_h diperhitungkan 20% $\phi_v V_n$

- g. Hitung momen terekspektasi pada balok bagian muka kolom (M_f):

$$M_f = M_{pr} + V_h S_h \quad (18)$$

- h. Hitung gaya dalam (F_{pr}) pada pelat sayap akibat M_f :

$$F_{pr} = \frac{M_f}{(d + t_p)} \quad (19)$$

- i. Periksa kecukupan jumlah baut yang diperkirakan pada tahap d:

$$n \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n R_n} \quad (20)$$

- j. Periksa kecukupan tebal pelat sayap yang diperkirakan untuk hitung tahap c:

$$t_p \geq \frac{F_{pr}}{\phi_d F_y b t_p} \quad (21)$$

Sambungan T Ganda menggunakan komponen Stab T yang harus berasal dari potongan profil *hot-rolled*. Stab T dibaut pada sayap balok dan sayap kolom menggunakan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt - HSB*). Model yang akan dianalisis memiliki 4 baut tarik seperti **Gambar 4**. Pilihan ini disesuaikan dengan profil IWF untuk balok yang disambung dan diselaraskan dengan tipe PSB yang hendak dibandingkan, yang juga memiliki 2 baris baut pada sambungan sayap balok untuk menyalurkan momen ke kolom.

Analisis mengikuti tahapan berikut [5] [6] [12]:

- a. Hitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis (M_{pr}) menggunakan persamaan (7) sampai persamaan (9).

- b. Hitung diameter baut geser maksimum (d_{vb}) menggunakan persamaan (22) dengan memperhitungkan penampang netto fraktur sayap balok menurut persamaan (23).

$$d_{vb} \leq \left(\frac{Z_x}{2 t_{fb} (d_b - t_{fb})} \right) \left(1 - \frac{R_y F_{yb}}{R_t F_{ub}} \right) - 3mm \quad (22)$$

$$Z_{x,net} R_t F_{ub} \geq Z_x R_y F_{yb} \quad (23)$$

$$Z_{x,net} = Z_x - \text{akibat adanya 2 lubang baut sayap}$$

- c. Tentukan kuat geser rencana (ϕR_{nv}) tiap baut.

Kondisi batas geser baut:

$$\phi R_n = \phi_n A_{bv} F_{nv} \quad (24)$$

Kondisi batas tumpu sayap balok:

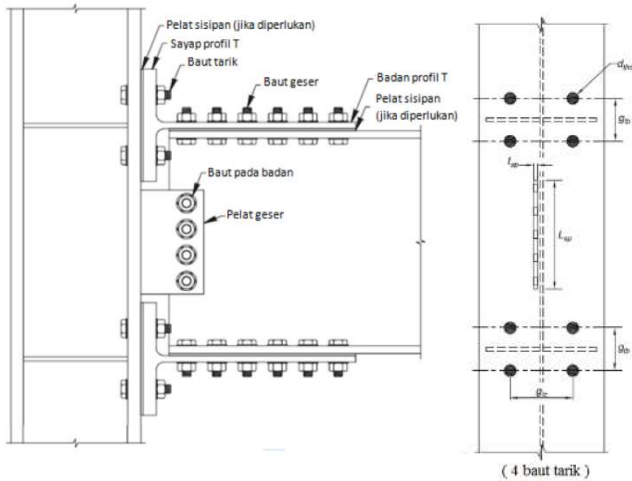
$$\phi R_n = \phi_d 2,4 d_{vb} t_{fb} F_{ub} \quad (25)$$

Kondisi batas tumpu badan Stab T:

$$\phi R_n = \phi_d 2,4 d_{vb} t_{st} F_{ut} \quad (26)$$

- d. Perkirakan jumlah baut geser (n_{vb}) pada tiap sayap balok:

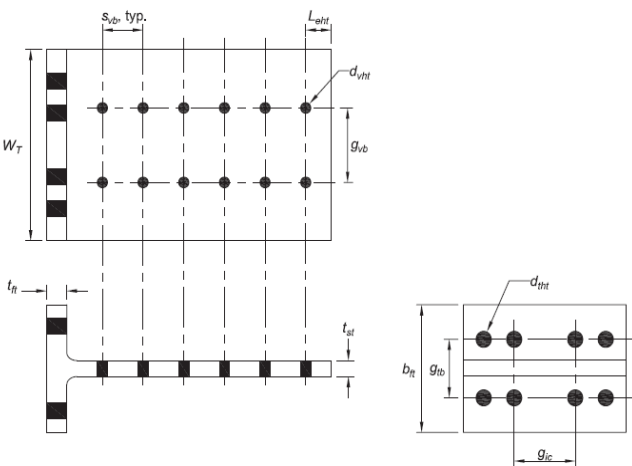
$$n_{vb} \geq \frac{1,25 M_{pr}}{d_b \phi_n R_n} \quad (27)$$



Gambar 4. Sambungan Terprakualifikasi Tipe T Ganda

- e. Tentukan lokasi sendi plastis (S_h) diukur dari muka kolom menggunakan persamaan (15) dan (16).
- f. Hitung gaya geser pada lokasi sendi plastis balok (V_h) menggunakan persamaan (17).
- g. Hitung momen terekspektasi pada balok bagian muka kolom (M_f) menggunakan persamaan (18).
- h. Hitung gaya yang terjadi pada T-Stub (F_{pr}) akibat M_f :

$$F_{pr} = \frac{M_f}{(1,05 d_b)} \quad (28)$$
- i. Tentukan tebal minimum badan Stab T (t_{st}) berdasarkan kondisi batas leleh penampang bruto dan retak penampang neto. Notasi jarak mengacu **Error! Reference source not found..**



Gambar 5. Stab T pada Sambungan Tipe T Ganda

Kondisi batas leleh, t_{st1} :

$$t_{st1} \geq \frac{F_{pr}}{\min(W_T, W_{Whit}) \phi_d F_{yt}} \quad (29)$$

Kondisi batas retak, t_{st2} :

$$t_{st2} \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n F_{ut} [\min(W_T, W_{Whit}) - 2(d_{vht} + 2mm)]} \quad (30)$$

$$Whitmore\ Width\ (W_{Whit}) = 2 L_{vb} \tan 30^\circ + g_{vb} \quad (31)$$

$$g_{vb} = W_T - 2 g_{1vb} = b_b - 2 g_{1vb} \quad (32)$$

- j. Tentukan diameter minimum baut tarik (d_{tb}) penyambung Stab T ke sayap kolom:

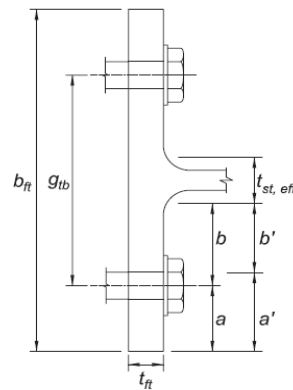
$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4F_{pr}}{n_{tb} \phi_n \pi F_{nt}}} \quad (33)$$

- k. Tentukan kuat rencana 1 baut tarik, ϕR_{nt} :

$$\phi R_{nt} = \phi_n A_{tb} F_{nt} \quad (34)$$

- l. Tentukan tebal sayap Stab T (t_{ft}), dengan notasi jarak seperti pada **Error! Reference source not found..**

$$t_{ft} = 2 \sqrt{\frac{\phi R_{nt} a' b'}{\phi_d F_{yt} p [a' + \delta(a' + b')]} \quad (35)$$



Gambar 6. Sayap Stab T

$$b_{ft} = g_{tb} + 2a \quad (36)$$

$$b = \frac{1}{2} (b_{ft} - t_{st}) - a \quad (37)$$

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb} \quad (38)$$

$$b' = b - \frac{1}{2} d_{tb} \quad (39)$$

$$p = 2W_T/n_{tb} \quad (40)$$

$$\delta = 1 - d_{tht}/p \quad (41)$$

- m. Periksa tebal sayap Stab T untuk mencegah efek prying:

$$t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4\phi R_{nt} b'}{\phi_d F_{yt} p}} \quad (42)$$

Keterangan notasi umum:

R_y : Rasio kuat leleh terekspektasi terhadap kuat leleh minimum terspesifikasi, $R_y = 1,5$

R_t : Rasio kuat tarik terekspektasi terhadap kuat tarik minimum terspesifikasi, $R_t = 1,2$

ϕ_n : Faktor ketahanan kondisi batas non-daktail, $\phi_n = 0,9$

ϕ_d : Faktor ketahanan kondisi batas daktail, $\phi_d = 1,0$

Tahapan analisis yang panjang, dilakukan menggunakan bantuan *spreadsheet* MS Excel yang sangat mendukung untuk penyelesaian perhitungan prosedural dan berulang.

3. Hasil dan Pembahasan

Perencanaan sambungan terpraktualifikasi, dimulai dengan pemeriksaan terhadap berbagai batasan/praktualifikasi spesifikasi profil dan penyambung [11]. Dengan memperhatikan tujuan dari penelitian ini, maka dipilih praktualifikasi yang memenuhi batasan baik untuk tipe PSB maupun T Ganda agar hasil analisis nantinya dapat dibandingkan. Rangkuman praktualifikasi spesifikasi profil dan penyambung untuk dilakukan analisis lebih lanjut seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Material Komponen Struktur dan Penyambung

Keterangan	Batasan (MPa)	
Profil Baja: BJ 41	$F_y = 250$	$F_u = 410$
Pelat Penyambung dan Stab T: ASTM A572M	$F_y = 345$	$F_u = 450$
Baut Penyambung: HSB A490 Tanpa ulir pada bidang geser	$F_{nv} = 579$	$F_{nt} = 780$

Selanjutnya dilakukan seleksi terhadap profil yang memenuhi sebagai komponen STGS dengan menghitung kelangsingan sayap profil (λ_f) menggunakan persamaan 1 dan kelangsingan badan profil (λ_w) menggunakan persamaan 4 seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Profil STGS untuk Sambungan PSB dan T Ganda

Kode Profil	w kg/m	D	b	t _w	t _f	r	λ_f	λ_w
Profil 1	21,3	200	100	5,5	8	11	6	29
Profil 2	29,6	250	125	6	9	12	7	35
Profil 3	36,7	300	150	6,5	9	13	8	39
Profil 4	49,6	350	175	7	11	14	8	43
Profil 5	66,0	400	200	8	13	16	8	43
Profil 6	76,0	450	200	9	14	18	7	43

PSB : $d_{maks} = W920$; $w_{maks} = 223$ kg/m ; $t_{f, maks} = 25$ mm
T Ganda: $d_{maks} = W610$; $w_{maks} = 82$ kg/m ; $t_{f, maks} = 15$ mm

Kelangsingan elemen profil pada **Tabel 2** harus tidak melebihi batas maksimum rasio lebar terhadap tebal yang dihitung menggunakan persamaan 2 dan persamaan 3 untuk sayap, serta persamaan 5 dan persamaan 6 untuk badan.

Rasio lebar/tebal sayap:

$$\text{Persamaan 2: } \lambda_{md} = 0,40 \sqrt{2 \cdot 10^5 / 250} = 11,31$$

$$\text{Persamaan 3: } \lambda_{hd} = 0,32 \sqrt{2 \cdot 10^5 / 250} = 9,05$$

Rasio lebar/tebal badan:

$$\text{Persamaan 5: } \lambda_{md} = 3,96 \sqrt{2 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 250} = 91,45$$

$$\text{Persamaan 6: } \lambda_{hd} = 2,57 \sqrt{2 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 250} = 59,35$$

A. Analisis Sambungan Terpraktualifikasi Tipe (PSB) [5] [6] [12]

Analisis sambungan PSB mengacu pada **Tabel 1** untuk spesifikasi profil dan penyambung, serta menggunakan pilihan profil pada **Tabel 2** yang telah dilakukan seleksi sebagai komponen STGS.

Analisis Profil 1: Balok IWF 200.100.5.5.8

Tinggi profil, $d = 200$ mm Tebal badan, $t_w = 5,5$ mm

Lebar sayap, $b_f = 100$ mm Tebal sayap, $t_f = 8$ mm

Luas, $A = 2716$ mm²

Jarak titik berat setengah profil IWF, $y = 71,7$ mm

a. Menghitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis (M_{pr}) menggunakan persamaan 7 sampai dengan persamaan 9.

$$Z_x = 2716 \cdot 71,7 = 194737 \text{ mm}^3$$

$$C_{pr} = \frac{250+410}{2 \cdot 250} = 1,32 \leq 1,2, \text{ gunakan } C_{pr} = 1,2$$

$$M_{pr} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 250 \cdot 194737 = 87631650 \text{ Nmm}$$

b. Menghitung diameter baut geser maksimum (d_{vb}) untuk mencegah keruntuhan tarik sayap balok menggunakan persamaan 10.

$$d_{vb} \leq \frac{100}{2} \left(1 - \frac{1,5 \cdot 250}{1,2 \cdot 410} \right) - 3 \text{ mm}$$

$$d_{vb} \leq 9 \text{ mm}$$

Karena HSB diameter < 9 mm tidak tersedia di pasaran, hitungan tidak dilanjutkan.

Analisis Profil 2: Balok IWF 250.125.6.9

Tinggi profil, $d = 250$ mm Tebal badan, $t_w = 6$ mm

Lebar sayap, $b_f = 125$ mm Tebal sayap, $t_f = 9$ mm

Luas, $A = 3766$ mm²

Jarak titik berat setengah profil IWF, $y = 97,2$ mm

a. Menghitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis (M_{pr}) menggunakan persamaan 7 sampai dengan persamaan 9.

$$Z_x = 3766 \cdot 97,2 = 366055 \text{ mm}^3$$

$$C_{pr} = \frac{250+410}{2 \cdot 250} = 1,32 \leq 1,2, \text{ gunakan } C_{pr} = 1,2$$

$$M_{pr} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 250 \cdot 366055 = 164724840 \text{ Nmm}$$

b. Menghitung diameter baut geser maksimum (d_{vb}) untuk mencegah keruntuhan tarik sayap balok menggunakan persamaan 10.

$$d_{vb} \leq \frac{125}{2} \left(1 - \frac{1,5 \cdot 250}{1,2 \cdot 410} \right) - 3 \text{ mm}$$

$$d_{vb} \leq 12 \text{ mm}, \text{ HSB diameter } 12 \text{ mm tersedia.}$$

Diameter lubang baut (d_{hb}) digunakan 14 mm.

- c. Menghitung kuat geser nominal (R_n) baut berdasarkan kondisi batas yang menentukan menggunakan persamaan 11 sampai dengan persamaan 13.

Kondisi batas geser baut:

$$R_{n1} = 1,0 \cdot 0,25 \pi \cdot 12^2 \cdot 579 = 65483 \text{ N}$$

Kondisi batas tumpu sayap balok:

$$R_{n2} = 2,4 \cdot 12 \cdot 9 \cdot 410 = 106272 \text{ N}$$

Kondisi batas tumpu pelat penyambung:

$$R_{n3} = 2,4 \cdot 12 \cdot 15 \cdot 450 = 194400 \text{ N}$$

Kuat geser nominal baut: R_n (min: R_{n1}, R_{n2}, R_{n3})

$$R_n = 65483 \text{ N}$$

Catatan:

Tebal pelat penyambung (t_p) diperkirakan lebih dahulu:

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

- d. Memperkirakan kebutuhan jumlah baut geser (n) menggunakan persamaan 14.

$$n \geq \frac{1,25 \cdot 164724840}{0,9 \cdot 65483 \cdot (250+15)}$$

$$n \geq 12,18 \quad , \text{ dicoba } 12 \text{ dipasang } 2 \text{ baris } @ 6 \text{ baut}$$

- e. Menentukan lokasi sendi plastis (S_h) diukur dari muka kolom menggunakan persamaan 15 dan persamaan 16.

$$\text{Jarak muka kolom ke baut geser pertama, } S_1 = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak antar baut geser, } S = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang penyaluran gaya, } L_{vb} = (\frac{1}{2} n - 1) S = 200 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak muka kolom ke baut geser terjauh/asumsi lokasi sendi plastis, } S_h = S_1 + L_{vb} = 220 \text{ mm}$$

- f. Menghitung gaya geser pada lokasi sendi plastis balok (V_h) menggunakan persamaan 17.

$$\phi_v V_n = 1 \cdot 0,6 \cdot 250 \cdot 250 \cdot 6 = 225000 \text{ N}$$

$$V_h \text{ (diperhitungkan } 20\% \phi_v V_n) = 45000 \text{ N}$$

- g. Menghitung momen terekspektasi pada balok bagian muka kolom (M_f) menggunakan persamaan 18.

$$M_f = 164724840 + 45000 \cdot 220 = 174624840 \text{ Nmm}$$

- h. Menghitung gaya dalam (F_{pr}) pada pelat sayap akibat M_f menggunakan persamaan 19.

$$F_{pr} = \frac{174624840}{(250+15)} = 658962 \text{ N}$$

- i. Memeriksa kecukupan jumlah baut yang diperkirakan pada tahap d menggunakan persamaan 20.

$$n \geq \frac{658962}{0,9 \cdot 65483}$$

$$n \geq 11 \quad , \text{ sehingga } 12 \text{ baut perkiraan awal mencukupi.}$$

- j. Memeriksa kecukupan tebal pelat sayap (t_p) yang diperkirakan untuk hitung tahap c menggunakan persamaan 21.

$$t_p \geq \frac{658962}{1 \cdot 345 \cdot 125} \quad (21)$$

$$t_p \geq 15 \text{ mm} \quad , \text{ sehingga } t_p = 15 \text{ mm} \text{ perkiraan awal cukup.}$$

Catatan:

Semua jarak baut ke tepi pelat yang disambung maupun jarak antar baut dalam perhitungan, telah memperhatikan syarat-

syarat yang ditetapkan dalam SNI 1729:2020 dan menggunakan pendekatan jarak minimum.

Tahapan analisis yang sama dilakukan untuk 6 profil yang akan dibandingkan dengan hasil seperti pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Analisis Sambungan PSB

Profil	Baut Geser		Pelat Penyambung			L_{bv}
	d	d_b	n_b	t_p	b_{tp}	
Kode	mm			mm		mm
Profil 1	200	≤ 9 (n.a)	-	-	-	-
Profil 2	250	12	12	15	125	238
Profil 3	300	12	14	16	150	278
Profil 4	350	16	10	18	175	249
Profil 5	400	20	8	22	200	240
Profil 6	500	20	10	24	200	300

Catatan:

Panjang pelat penyambung, L_p : jarak muka kolom ke baut terjauh + 1,5 d_b .

Panjang kelompok baut, L_{bv} : jarak baut terdekat - terjauh dr muka kolom.

B. Analisis Sambungan Terprakualifikasi Tipe T Ganda [5] [6] [12]

Analisis sambungan T Ganda mengacu pada **Tabel 1** untuk spesifikasi profil dan penyambung, serta menggunakan pilihan profil pada **Tabel 2** yang telah dilakukan seleksi sebagai komponen STGS.

Analisis Profil 1: Balok IWF 200.100.5,5,8

Tinggi profil, $d_b = 200 \text{ mm}$ Tebal badan, $t_{wb} = 5,5 \text{ mm}$

Lebar sayap, $b_b = 100 \text{ mm}$ Tebal sayap, $t_{fb} = 8 \text{ mm}$

Luas, $A = 2716 \text{ mm}^2$

Jarak titik berat setengah profil IWF, $y = 71,7 \text{ mm}$

- a. Menghitung momen maksimum yang mungkin terjadi pada sendi plastis (M_{pr}) menggunakan persamaan 7 sampai dengan persamaan 9.

$$Z_x = 2716 \cdot 71,7 = 194737 \text{ mm}^3$$

$$C_{pr} = \frac{250+410}{2 \cdot 250} = 1,32 \leq 1,2 \quad , \text{ gunakan } C_{pr} = 1,2$$

$$M_{pr} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 250 \cdot 194737 = 87631650 \text{ Nmm}$$

- b. Menghitung diameter baut geser maksimum (d_{vb}) menggunakan persamaan (22) dengan memperhitungkan penampang neto fraktur sayap balok menurut persamaan (23).

$$d_{vb} \leq \left(\frac{194737}{2 \cdot 8 \cdot (200-8)} \right) \left(1 - \frac{1,5 \cdot 250}{1,2 \cdot 410} \right) - 3 \text{ mm}$$

$$d_{vb} \leq 12 \text{ mm}$$

Digunakan diameter baut geser, $d_{vb} : 12 \text{ mm}$

Diameter lubang, $d_{vht} : 14 \text{ mm}$

Syarat yang harus dipenuhi:

$$Z_{x,net} = (2716 - 2 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 8) \cdot 71,7 = 162616 \text{ mm}^3$$

$$Z_{x,net} R_t F_{ub} \geq Z_x R_y F_{yb}$$

$$162616 \cdot 1,2 \cdot 410 \geq 194737 \cdot 1,5 \cdot 250$$

$$80006875 > 73026450 \quad , \text{ persamaan 23 terpenuhi!}$$

- c. Menghitung kuat geser rencana (ϕR_{nv}) baut berdasarkan kondisi batas yang menentukan menggunakan persamaan 24 sampai dengan persamaan 26.

Kondisi batas geser baut:

$$\phi R_n = 0,9 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 12^2 \cdot 579 = 58935 \text{ N}$$

Kondisi batas tumpu sayap balok:

$$\phi R_n = 1 \cdot 2,4 \cdot 12 \cdot 8 \cdot 410 = 94464 \text{ N}$$

Kondisi batas tumpu badan Stab T:

$$\phi R_n = 1 \cdot 2,4 \cdot 12 \cdot 8 \cdot 450 = 103680 \text{ N}$$

$$\text{Kuat geser rencana baut: } \phi R_n \text{ (min: } \phi R_{n1}, \phi R_{n2}, \phi R_{n3}) \\ \phi R_n = 58935 \text{ N}$$

Catatan:

Tebal badan Stab T diperkirakan lebih dulu sama dengan tebal sayap balok, $t_{st} = t_{tb} = 8 \text{ mm}$.

- d. Memperkirakan jumlah baut geser (n_{vb}) pada tiap sayap balok menggunakan persamaan 27.

$$n_{vb} \geq \frac{1,25 \cdot 87631650}{200 \cdot 58935}$$

$$n_{vb} \geq 9,29$$

Dicoba 10 baut dipasang 2 baris @ 5 baut

- e. Menentukan lokasi sendi plastis (S_h) diukur dari muka kolom menggunakan persamaan 15 dan persamaan 16.

$$\text{Jarak muka kolom ke baut geser pertama, } S_1 = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak antar baut geser, } S_{vb} = 40 \text{ mm}$$

Panjang penyaluran gaya,

$$L_{vb} = (\frac{1}{2} n_{vb} - 1) S_{vb} = 160 \text{ mm}$$

Jarak muka kolom ke baut geser terjauh/asumsi lokasi sendi plastis, $S_h = S_1 + L_{vb} = 210 \text{ mm}$

- f. Menghitung gaya geser pada lokasi sendi plastis balok (V_h) menggunakan persamaan (17).

$$\phi_v V_n = 1 \cdot 0,6 \cdot 250 \cdot 200 \cdot 5,5 = 165000 \text{ N}$$

$$V_h \text{ (diperhitungkan 20\% } \phi_v V_n) = 33000 \text{ N}$$

- g. Menghitung momen terekspektasi pada balok bagian muka kolom (M_f) menggunakan persamaan (18).

$$M_f = 87631650 + 33000 \cdot 210 = 94561650 \text{ Nmm}$$

- h. Menghitung gaya yang terjadi pada T-Stub (F_{pr}) akibat M_f menggunakan persamaan 28.

$$F_{pr} = \frac{94561650}{(1,05 \cdot 200)} = 450294 \text{ N}$$

- i. Menentukan tebal minimum badan Stab T (t_{st}) berdasarkan kondisi batas leleh penampang bruto dan retak penampang neto menggunakan persamaan 29 sampai dengan persamaan 32.

Jarak lubang baut ke tepi badan Stab T, $g_{lvb} = 20 \text{ mm}$

Lebar Stab T paralel sayap kolom sama dengan lebar sayap balok, $W_T = 100 \text{ mm}$

$$g_{vb} = 100 - 2 \cdot 20 = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Whitmore Width (} W_{\text{whit}}) = 2 \cdot 160 \cdot \tan 30^\circ + 60 \\ = 245 \text{ mm}$$

Tebal minimum badan Stab T - kondisi batas leleh, t_{st1} :

$$t_{st1} \geq \frac{450294}{100 \cdot 1 \cdot 345}$$

$$t_{st1} \geq 13 \text{ mm}$$

Tebal minimum badan Stab T - kondisi batas retak, t_{st2} :

$$t_{st2} \geq \frac{450294}{0,9 \cdot 450 \cdot [100 - 2(14+2)]}$$

$$t_{st2} \geq 16 \text{ mm}$$

Tebal minimum badan Stab T yang menentukan:

$$t_{st} \geq 16 \text{ mm}$$

- j. Menentukan diameter minimum baut tarik (d_{tb}) penyambung Stab T ke sayap kolom menggunakan persamaan 33.

$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 450294}{4 \cdot 0,9 \cdot \pi \cdot 780}}$$

$$d_{tb} \geq 14 \text{ mm}$$

Digunakan diameter baut tarik, $d_{tb} = 16 \text{ mm}$

$$d_{tht} = 18 \text{ mm}$$

- k. Menentukan kuat rencana 1 baut tarik, ϕR_{nt} menggunakan persamaan 34.

$$\phi R_{nt} = 0,9 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 16^2 \cdot 780 = 141145 \text{ N}$$

- l. Menentukan tebal sayap Stab T (t_{ft}) menggunakan persamaan 35 sampai dengan persamaan 41.

$g_{tb} = 48 \text{ mm}$ (digunakan jarak baut minimum)

$$a = 1,5 d_{tb} = 24 \text{ mm}$$

$$b_{ft} = 48 + 2 \cdot 24 = 96 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1}{2} (96 - 16) - 24 = 16 \text{ mm}$$

$$a' = 24 + \frac{1}{2} \cdot 16 = 32 \text{ mm}$$

$$b' = 16 - \frac{1}{2} \cdot 16 = 8 \text{ mm}$$

$$p = (2 \cdot 100)/4 = 50 \text{ mm}$$

$$\delta = 1 - 18/50 = 0,64$$

$$t_{ft} = 2 \sqrt{\frac{141145 \cdot 32 \cdot 8}{1 \cdot 345 \cdot 50 \cdot [32 + 0,64 \cdot (32 + 8)]}}$$

$$t_{ft} = 12 \text{ mm}$$

- m. Memeriksa tebal sayap Stab T untuk mencegah efek *prying* menggunakan persamaan 42.

$$t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4 \cdot 141145 \cdot 8}{1 \cdot 345 \cdot 50}}$$

$$t_{ft,crit} = 16 \text{ mm}$$

Disyaratkan tebal sayap Stab T untuk mencegah efek *prying*, $t_{ft,crit} = 16 \text{ mm}$.

Tahapan analisis yang sama dilakukan untuk 6 profil yang akan dibandingkan dengan hasil seperti pada **Tabel 4**. Keseluruhan analisis dilakukan dengan memperhatikan jarak antar baut maupun jarak baut ke tepi pelat yang ditetapkan

dalam ketentuan [9] [10] dan menggunakan pendekatan jarak minimum yang disyaratkan.

Tabel 4. Hasil Analisis Sambungan T Ganda

Kode	Baut Geser		Ukuran Stab T			
	d_{bv}	n_{bv}	t_{st}	t_r	b_r	L_t
	mm		mm			
Profil 1: 4 baut tarik $\phi 16$	12	10	16	16	96	218
Profil 2: 4 baut tarik $\phi 20$	12	14	18	21	120	308
Profil 3: 4 baut tarik $\phi 20$	16	10	18	19	120	279
Profil 4: 4 baut tarik $\phi 24$	20	10	22	23	144	325
Profil 5: 4 baut tarik $\phi 27$	20	12	24	26	162	385
Profil 6: 4 baut tarik $\phi 30$	24	10	29	30	180	396

Catatan:

Panjang stab T, L_t : jarak muka kolom ke baut terjauh + 1,5 d_b .

Analisis sambungan yang dilakukan untuk ke dua tipe telah memperhitungkan kondisi yang sama yaitu, besar momen maksimum pada sendi plastis (M_{pr}) dan gaya geser sambungan (V_h), sehingga hasil pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**, untuk profil yang sama memiliki kapasitas sambungan yang sama.

Hasil analisis sambungan PSB menurut SNI 7972:2020 pada **Tabel 3** cenderung menghasilkan batasan ukuran diameter baut (d_b) yang lebih kecil. Seperti Profil 1 yaitu IWF 200.100.5,5.8 untuk mencegah keruntuhan tarik sayap balok, diameter baut maksimum dibatasi 9 mm, sementara baut mutu tinggi (HSB) yang harus digunakan pada sambungan terpraktualifikasi memiliki diameter minimum 12 mm. Karena batasan ukuran diameter baut yang lebih kecil, maka logis jika kebutuhan jumlah baut akan lebih banyak. Untuk hal ini terdapat batasan panjang kelompok baut (L_{bv}) yang tidak boleh lebih dari tinggi penampang balok (d). Pelat penyambung dengan ukuran yang bervariasi ($t_p \times b_p \times L_p$) tidak sulit pemenuhannya karena berasal dari pelat yang dipotong.

Ketentuan SNI 7972:2020 untuk sambungan T ganda dengan hasil analisis pada **Tabel 4** memberi batas maksimum diameter baut geser (d_{bv}) maupun baut tarik (d_{bt}) yang lebih besar, sehingga terdapat beberapa ukuran diameter baut yang dapat dipilih seperti untuk kode profil 2 dan kode profil yang lebih besar. Minimum tebal badan Stab T (t_{st}) yang dibutuhkan cukup besar. Menggunakan pilihan diameter baut

geser (d_{bv}) yang lebih besar seperti hasil analisis untuk Profil 5 yaitu IWF 400.200.8.13 yang memungkinkan penggunaan 3 ukuran baut geser (20, 22, dan 24 mm), akan mengurangi jumlah baut (n_{bv}) yang dibutuhkan dan panjang Stab T (L_t), tetapi menambah kebutuhan tebal badan Stab T (t_{st}). Hal ini perlu menjadi perhatian dikarenakan Stab T harus berasal dari profil *hot-rolled* yang dipotong dan dengan tebal badan seperti yang disyaratkan (t_{st}) bukan merupakan dimensi yang umum sehingga perlu dipertimbangkan ketersediaannya di pasaran.

Sebagaimana tujuan penelitian, hasil analisis kedua tipe sambungan bukan untuk menghasilkan perbandingan mutlak keunggulan salah satu tipe. Berikut kelebihan tiap tipe dan faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan pilihan sambungan terpraktualifikasi untuk struktur baja dengan aplikasi beban seismik:

A. Sambungan PSB

Kelebihan:

- Dapat digunakan untuk sambungan balok sampai W920 ($w = 223 \text{ kg/m}$, tebal sayap $\leq 25 \text{ mm}$).
- Variasi dimensi pelat penyambung yang dibutuhkan lebih mudah dipenuhi karena menggunakan pelat baja yang dipotong.

Perlu menjadi perhatian:

- Ketersediaan ukuran baut untuk sambungan balok W200 dan lebih kecil ($d_b \leq 9 \text{ mm}$).
- Analisis menghasilkan ukuran diameter baut (d_b) yang relatif lebih kecil sehingga jumlah baut (n_b) yang dibutuhkan menjadi lebih banyak, tetapi terdapat batasan panjang kelompok baut yang tidak lebih dari tinggi penampang balok ($L_{bv} < d$).
- Las penyambung pelat ke sayap kolom harus dilaksanakan di bengkel yang memiliki fasilitas yang mendukung dengan pengawasan yang ketat pada prosedur dan hasil kerja las.

B. Sambungan T Ganda

Kelebihan:

- Masih tersedia ukuran baut untuk sambungan balok W200 dan lebih kecil.
- Analisis menghasilkan ukuran diameter baut (d_b) yang relatif lebih besar yang berarti jumlah baut (n_b) dibutuhkan lebih sedikit. Tidak terdapat batasan panjang kelompok baut terhadap tinggi penampang balok.
- Gaya pada sayap tarik balok disalurkan ke kolom oleh Stab T yang merupakan profil *hot rolled*, sehingga tidak memerlukan penangan khusus.

Perlu menjadi perhatian:

- Hanya untuk sambungan balok sampai W610 ($w = 82 \text{ kg/m}$, tebal sayap $\leq 15 \text{ mm}$).

- b. Ketersediaan di pasaran untuk kebutuhan dimensi Stab T yang berasal dari profil W yang dipotong.

4. Simpulan

Hasil analisis sambungan terpraktualifikasi secara khusus tipe PSB dan T Ganda, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Perencanaan struktur rangka baja di Indonesia, dengan memperhitungkan kinerja seismik diatur dalam SNI 7860:2020. Sambungan struktur harus direncanakan sebagai sambungan terpraktualifikasi menurut ketentuan SNI 7972:2020 dengan tetap memperhatikan spesifikasi umum sambungan yang terdapat pada SNI 1729:2020.
- b. Sambungan terpraktualifikasi tipe PSB memiliki rentang penerapan untuk profil balok yang lebih besar sampai dengan W920 ($w = 223 \text{ kg/m}$, tebal sayap $\leq 25 \text{ mm}$) dibandingkan T Ganda yang dibatasi hanya sampai W610 ($w = 82 \text{ kg/m}$, tebal sayap $\leq 15 \text{ mm}$).
- c. Analisis sambungan PSB menghasilkan ukuran diameter baut yang relatif lebih kecil dengan jumlah baut lebih banyak namun batasan panjang kelompok baut harus tidak melebihi ukuran tinggi penampang balok. Untuk kebutuhan ukuran pelat penyambung yang bervariasi, tidak menjadi kesulitan karena diperoleh dari pelat baja yang dipotong. Las penyambung pelat ke sayap kolom harus dilaksanakan di bengkel yang memiliki fasilitas yang mendukung dengan pengawasan ketat terhadap prosedur dan hasil kerja.
- d. Analisis sambungan T Ganda menghasilkan ukuran diameter baut yang lebih besar dengan jumlah baut lebih sedikit. Tidak ada pembatasan panjang kelompok baut. Hal yang perlu diperhatikan adalah kebutuhan dimensi Stab T yang berasal dari profil W yang dipotong.
- e. Rinci dan panjangnya prosedur perhitungan, diperlukan bantuan *tools* komputasi. Untuk penelitian ini menggunakan bantuan *spreadsheet* MS Excel yang cukup mendukung perhitungan prosedural dan berulang.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sutjipto and I. Sumeru, "Sambungan Terpraktualifikasi Menurut RSNI 7972:20xx (Adopsi AISC 358-16/358s1-18)," 2019.
- [2] A. Sato, J. D. Newell, and C. M. Uang, "Cyclic Behavior and Seismic Design of Bolted Flange Plate Steel Moment Connections," *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, vol. 45, pp. 221–232, 2008.
- [3] J. A. Swanson and R. T. Leon, "Bolted Steel Connection: Tests on T-Stub Components," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 126, pp. 50–56, 2000.
- [4] W. Dewobroto, *Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain - AISC 2010*, 2nd ed. Tangerang: Jurusan Teknik Sipil UPH, 2016.
- [5] AISC, "ANSI/AISC 358-16/358s1-18 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplements No. 1 and No. 2," 2018.
- [6] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 7972:2020 Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik," 2020.
- [7] AISC, "ANSI/AISC 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," 2016.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 7860:2020 Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural," 2020.
- [9] AISC, "ANSI/AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings," 2016.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural," 2020.
- [11] S. Bouchard and G. Axmann, "ASTM A913 Grade 50 and Grade 65: Steels for Seismic Applications," in *STESSA 2000: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, CRC Press, 2000.
- [12] AISC, "Companion to The AISC Steel Construction Manual Volume 1: Design Examples Version 15.1," 2019.

Halaman ini sengaja dikosongkan