

Studi Analitis dan Eksperimental Pengaruh Spasi Baut pada Sambungan Kritis Selip Struktur Baja

Noek Sulandari ^{[1]*}, Cindrawaty Lesmana ^[2]

^[1] Program Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 40164, Indonesia

^[2] Program Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 40164, Indonesia

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

*) Corresponding Author

Received: 24 November 2025; **Revised:** 28 January 2026; **Accepted:** 19 February 2026

How to cited this article:

Sulandari, N., Lesmana, C., (2026). Studi Analitis dan Eksperimental Pengaruh Spasi Baut pada Sambungan Kritis Selip Struktur Baja. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 115–131. <https://doi.org/10.28932/jts.v22i1.13873>

ABSTRAK

Sambungan baja menggunakan baut tipe kritis selip mengandalkan kekuatan jepitan permukaan yang disambung akibat pemberian pra-tarik baut mutu tinggi (*High Strength Bolt* - HSB) yang digunakan, sehingga lebih rumit pengaplikasiannya dan lebih mahal dibandingkan sambungan tipe tumpu dengan pengencangan baut sampai kondisi *snug tight*. Meskipun demikian SNI 1729:2020 dan SNI 7972:2020 mensyaratkan sambungan baut dengan pra-tarik harus digunakan pada sambungan ujung komponen rangkap dan jika bekerja beban vibrasi/beban dinamis. Tujuan penelitian ini adalah melakukan studi analitis dan eksperimental pengaruh spasi baut yang berarti pengaruh jarak titik jepitan terhadap kuat geser sambungan baut kritis selip. Studi analitis dilakukan mengikuti peraturan yang berlaku, yaitu SNI 1729:2020. Studi eksperimental di laboratorium menggunakan HSB A325 M-12 dengan 3 (tiga) model benda uji, masing-masing 3 (tiga) spesimen yang dibedakan menurut spasi baut. Hasil uji kuat geser nominal sambungan kritis selip adalah 73 kN untuk benda uji 1 (spasi 40 mm) dan 60 kN untuk benda uji 2 (spasi 70 mm) dan benda uji 3 (spasi 96 mm). Terjadi perubahan/penurunan kekuatan sambungan dengan meningkatnya spasi baut/bertambahnya jarak jepitan namun secara keseluruhan masih memenuhi hasil perhitungan kuat nominal sambungan kritis-selip menurut ketentuan yang berlaku, yaitu 35,94 kN.

Kata kunci: *Sambungan Baut, Sambungan Kritis Selip, Spasi Baut.*

ABSTRACT. *Analytical and Experimental Study of Bolt Spacing Effect on Slip-Critical Connections in Steel Structures. Bolt steel connections using slip-critical type rely on the clamping strength of the connected surfaces due to the pre-tensioning of high-strength bolts (HSB) used, making them more complicated to apply and more expensive than bearing-type connections with bolt tightening to snug-tight conditions. However, SNI 1729:2020 and SNI 7972:2020 require that pre-tensioned bolt connections must be used at the end connections of double components and if working under vibration/dynamic loads. The purpose of this study is to conduct an analytical and experimental study of the effect of bolt spacing which means the effect of the distance of the clamping point on the shear strength of the critical slip bolt connection. The analytical study was carried out following the regulations, namely SNI 1729: 2020. Experimental studies in the laboratory used HSB A325 M-12 with 3 (three) test specimen models, each 3 (three) specimens distinguished by bolt spacing. The results of the nominal shear strength test of the critical slip connection were 73 kN for test specimen 1 (40 mm spacing) and 60 kN for test specimen 2 (70 mm spacing) and test specimen 3 (96 mm spacing). There was a change/decrease in the strength of the connection with increasing bolt spacing which means increasing the clamping distance but overall, it still met the results of the calculation of the critical-slip connection nominal strength according to provisions, which was 35.94 kN.*

Keywords: *Bolted Connections, Slip-Critical Connections, Bolt Spacing.*

1. PENDAHULUAN

Baja struktural sebagai salah satu alternatif material struktur bangunan memiliki keunggulan dibandingkan kayu maupun beton meskipun bukan yang paling populer digunakan di Indonesia. Sebagai hasil rekayasa industri, bahan baja struktural memiliki sifat mekanis yaitu: kekuatan dan daktilitas yang lebih baik. Dengan sifat ini akan dihasilkan bangunan yang lebih ringan sehingga selain menghasilkan sistem fondasi yang lebih ringan, struktur bangunan baja lebih menguntungkan untuk bangunan tahan gempa mengingat bahwa gaya gempa berbanding lurus dengan massa bangunan (Dewobroto, 2016).

Struktur rangka baja terdiri dari elemen-elemen yaitu: balok, kolom, dan lainnya yang melengkapi, disambungkan satu dengan lainnya menggunakan alat penyambung sehingga membentuk satu kesatuan struktur yang dapat berfungsi sebagaimana direncanakan. Perencanaan sambungan struktur baja menjadi hal yang krusial dalam desain dan konstruksi karena menentukan kinerja keseluruhan sistem struktur dalam menahan beban-beban yang direncanakan bekerja (SNI 1729:2020; SNI 7972:2020).

Terdapat 2 tipe sambungan baja menggunakan baut yang dibedakan menurut mekanisme pengalihan gaya. Pertama adalah tipe kritis selip yang mengandalkan tahanan friksi permukaan pelat/jepitan antar pelat yang disambung melalui pemberian pra-tarik baut mutu tinggi (*High Strength Bolt* - HSB) yang digunakan. Kedua adalah sambungan baut tipe tumpu dengan kekuatan sambungan selain ditentukan oleh kekuatan baut yang dikencangkan pas (*snug tight*), juga oleh kuat tumpu antara badan baut dan bagian elemen-elemen yang disambungkan.

Gaya pra-tarik pada HSB sambungan kritis-selip, antara lain diberikan melalui cara putar mur (*turn-of-nut*) menggunakan kunci biasa maupun kunci-pas (*torque wrenches*) yang keduanya memberikan hasil kuat sambungan yang tidak jauh berbeda (Gutama et al., 2015). Adanya pemberian pra-tarik baut setelah kondisi kencang pas (*snug tight*) tercapai, membuat sambungan kritis selip lebih rumit pengaplikasiannya dan lebih mahal (Grondin et al., 2008) dibandingkan sambungan tipe tumpu. Meskipun demikian, baut dengan pra-tarik harus digunakan antara lain (SNI 1729:2020; SNI 7860:2020; Sulandari et al., 2023):

- a. Pada sambungan ujung komponen struktur tersusun/rangkap.
- b. Pada sambungan struktur yang memikul beban vibrasi.
- c. Pada sambungan struktur yang direncanakan menerima beban gempa.

Pada sambungan dengan baut, jarak/spasi baut minimum – maksimum diatur. Untuk sambungan tipe tumpu dimaksudkan untuk mencegah kerusakan lubang dan kegagalan pelat yang disambung, sementara pada tipe kritis selip spazi baut berarti jarak antara titik-titik jepitan.

Melalui penelitian ini hendak dibandingkan hasil studi analitis dan eksperimental pengaruh spasi baut yang berarti pengaruh jarak titik jepitan terhadap kekuatan jepitan yang ditimbulkan pra-tarik baut pada sambungan kritis selip.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan melalui pendekatan kuantitatif mengikuti standar yang berlaku di Indonesia saat ini yaitu SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Bagian standar yang terkait antara lain: jarak tepi, jarak antar lubang/spasi baut minimum dan maksimum serta kondisi batas untuk menentukan kekuatan sambungan baut.

Uji eksperimental dilakukan di Laboratorium Struktur dan Beton, Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*). Standar pengujian mengikuti *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ASTM E8/E8M - 16a, 2016)* yang merupakan standar pengujian spesimen logam/baja yang dibebani tarik. Terhadap alat penyambung baut yang terpasang pada spesimen akan bekerja sebagai beban geser sesuai dengan tujuan dari penelitian ini.

Data primer yang diperoleh dari uji eksperimental adalah besar beban yang bekerja vs deformasi yang terjadi. Untuk sambungan kritis selip yang mengandalkan kekuatan jepitan antar plat yang disambung, dipasang *strain gauge* untuk mengamati hubungan beban vs slip antar plat.

2.1 Spasi Baut

Jarak pemasangan/spasi baut mengikuti ketentuan yang diatur secara ketat dalam SNI 1729:2020 Sub Bab J3.3 sampai Sub Bab J3.5 dan ANSI/AISC 360-16 Sub Bab J3.4.

A. Jarak minimum

- a. Jarak as ke as antar lubang standar $\geq 2 \frac{2}{3} d$ (3d lebih disukai).
- b. Jarak as lubang tepi ke tepi bagian yang disambung dalam arah manapun tidak kurang dari yang ditetapkan pada Tabel 1.

B. Jarak maksimum

- a. Jarak as ke as antar lubang standar ≤ 24 tebal bagian tertipis dan ≤ 300 mm, untuk komponen struktur yang dicat/tidak dicat tanpa potensi korosi atmosfer.
- b. Jarak as lubang tepi ke tepi bagian yang disambung ≤ 12 tebal bagian tertipis dan ≤ 150 mm.

Tabel 1. Jarak Tepi Minimum dari Pusat Lubang Standar

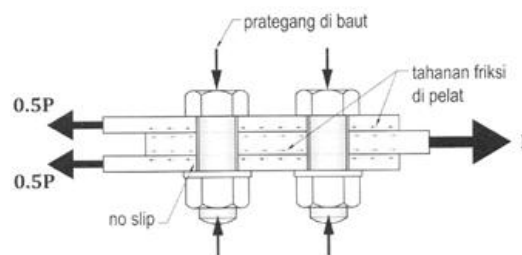
Diameter Baut (in)	Jarak Tepi Minimum (in)
0,500	0,750
0,625	0,875
0,750	1,000
0,875	1,125
1,000	1,250

Sumber: (ANSI/AISC 360-16, 2016)

Untuk baut diameter 12 mm ($\frac{1}{2}$ inch) yang digunakan pada penelitian ini, jarak tepi minimum adalah sebesar $\frac{3}{4}$ inch (19 mm).

2.2 Kekuatan Sambungan Baut

Mekanisme pengalihan gaya sambungan baut kritis selip seperti pada Gambar 1. Penggunaan baut mutu tinggi (HSB) dengan pemberian pra-tarik (*pre-tension*) akan menghasilkan jepitan antar pelat sehingga saat beban bekerja, tahanan friksi bidang kontak menjadi kekuatan sambungan.



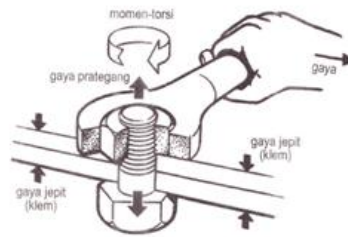
Gambar 1. Mekanisme Pengalihan Gaya pada Sambungan Baut Tipe Kritis Selip
 Sumber: (Dewobroto, 2016)

Besar gaya pra-tarik baut minimum terdapat pada Tabel 2. Pada pengujian diberikan melalui cara putar mur (*turn-of-nut*) menggunakan kunci-torsi (*torque wrenches*) seperti Gambar 2 yang merupakan salah satu yang direkomendasikan dengan tambahan putaran mur dari kondisi kencang pas (*snug-tight*) mengikuti ketentuan Tabel 3.

Tabel 2. Gaya Pra-Tarik Minimum

Diameter (inch)	Diameter (mm)	A325 (Group A)		A490 (Group B)	
		(kips)	(kN)	(kips)	(kN)
$\frac{1}{2}$	-	12	-	15	-
$\frac{5}{8}$	M16	19	91	24	114
$\frac{3}{4}$	M20	28	142	35	179
$\frac{7}{8}$	M22	39	176	49	221
1	M24	51	205	64	257

Sumber: (ANSI/AISC 360-16, 2016)



Gambar 2. Pra-Tarik Baut Cara *Turn-of-Nut*
 Sumber: (Dewobroto, 2016)

Tabel 3. Tambahan Putaran Mur dari Kondisi *Snug-Tight*

Panjang Baut (L)	Kedua Permukaan Normal terhadap Sumbu Baut
$L \leq 4 d_b$	1/2 putaran
$4d_b < L \leq 8 d_b$	1/2 putaran
$8d_b < L \leq 12 d_b$	2/3 putaran

Sumber: (Salmon et al., 2009)

Kuat nominal sambungan mekanisme kritis selip untuk baut yang menerima geser menurut SNI 1729:2020 Sub Bab J3.8 seperti pada Persamaan (1).

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (1)$$

Keterangan:

R_n : kuat nominal yang dihasilkan penyambung

μ : koefisien slip rata-rata yang tergantung kondisi permukaan

0,3 untuk permukaan kelas A (permukaan baja *mill scale* bersih tanpa di cat dan setara)

0,5 untuk permukaan kelas B (permukaan baja *blast-cleaned* tanpa di cat dan setara)

D_u : 1,13 sebagai faktor pengali, merepresentasikan gaya pra-tarik baut rata-rata terpasang dan gaya pra-tarik baut minimum

h_f : faktor pengaruh keberadaan pelat pengisi (*filler*) pada sambungan

1,0 jika tidak ada atau hanya satu *filler*

T_b : gaya pra-tarik baut minimum seperti disyaratkan pada Tabel 2

n_s : jumlah bidang slip/bidang kontak pelat yang menghasilkan tahanan friksi

Meskipun direncanakan tidak terjadi slip dan beban sepenuhnya ditahan oleh kekuatan friksi antar permukaan pelat, namun sambungan harus tetap dipastikan mampu menahan geser dan tumpu (perilaku sambungan tipe tumpu) jika beban lebih terjadi (Segui, 2018).

Kuat nominal sambungan tumpu untuk baut yang menahan geser menurut SNI 1729:2020 Sub Bab J3.6 dan Sub Bab J3.10 mengikuti Persamaan (2) sampai Persamaan (4).

Kuat nominal geser, untuk tiap bidang geser:

$$R_n = F_{nv} A_g \quad (2)$$

Keterangan:

A_g : luas penampang baut (mm^2)

F_{nv} : tegangan geser nominal, untuk HSB A325 sebesar 372 MPa jika ulir tidak dikecualikan dari bidang geser, 469 MPa jika ulir tidak termasuk pada bidang geser

Kuat nominal tumpu lubang baut (tumpu baut-pelat):

$$R_n = 2,4 d_b t F_u \quad (3)$$

Kuat nominal robekan jalur lubang-lubang baut:

$$R_n = 1,2 l_c t F_u \quad (4)$$

Keterangan:

d_b : diameter baut nominal (mm)

t : tebal tertipis pelat yang disambung (mm)

l_c : jarak neto dalam arah gaya, antara tepi lubang ke tepi lubang yang berdekatan, atau tepi dari material (mm)

F_u : tegangan tarik putus material baja yang disambung (MPa)

Perhitungkan jarak neto l_c , menggunakan diameter lubang (d_l):

$$d_l = d_b + 2 \text{ mm} \quad \text{untuk } d_b \leq 24 \text{ mm} \quad (5)$$

2.3 Penyiapan Benda Uji

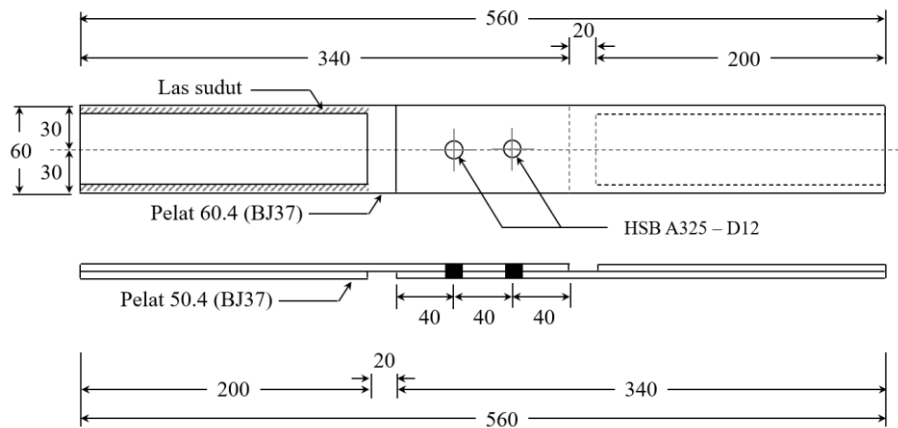
Benda uji pada eksperimen terdiri dari 3 (tiga) jenis, 3 buah tiap jenisnya. Sketsa pada Gambar 3 sampai Gambar 5 dengan spesifikasi berikut:

1. Menggunakan pelat ukuran penampang ($b \times t_p$): 60 x 4 mm, mutu BJ 37.
2. Penyambung menggunakan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt* – HSB) berjumlah 2 buah dari grup A-325, diameter (d_b) 12 mm, ulir penuh.
3. Jenis lubang untuk baut penyambung adalah lubang standar, yaitu 14 mm untuk baut diameter 12 mm (ANSI/AISC 360-16, 2016).
4. Bidang permukaan kelas A (permukaan *mill scale* bersih/bersih skala pabrik).
5. Sambungan tanpa pengisi (*filler*).
6. Jarak pusat baut ke tepi terdekat/jarak tepi searah gaya (s_t) digunakan 40 mm (memenuhi ketentuan untuk baut diameter 12 mm: $3/4" \leq s_t \leq 12 t_p$ yang berarti $19 \text{ mm} \leq s_t \leq 48 \text{ mm}$).
7. Tiga jenis benda uji mewakili spasi antar baut (s) pada Tabel 4.
8. *Pre-tension* baut cara putar mur (*turn-of-nut*) menggunakan kunci-torsi (*torque wrenches*).
9. Pengujian terhadap pelat adalah uji tarik, yang bekerja sebagai gaya geser terhadap baut.
10. Untuk keperluan pengujian agar benda uji dapat dipasang dan mendapat jepitan pada UTM, digunakan 2 pelat dengan ukuran penampang 50 x 4 mm panjang 200 mm (BJ 37), dilekatkan pada tiap ujung dengan las untuk meratakan permukaan.

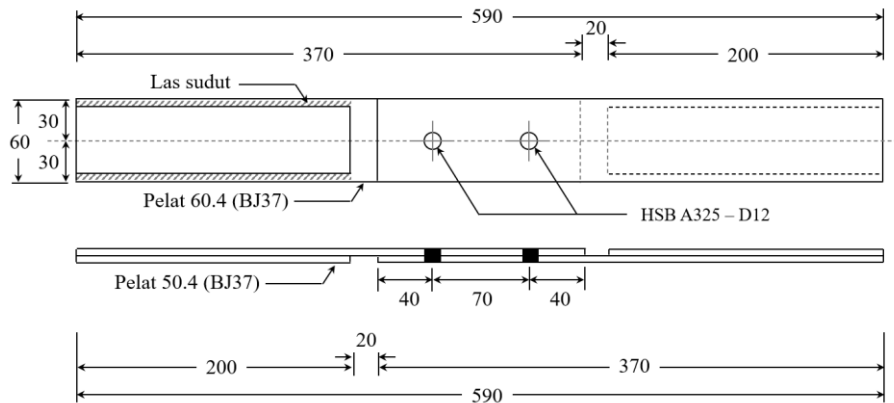
11. Mutu material pelat dan baut pada spesifikasi benda uji yang direncanakan, hanya berdasarkan *mill certificate* (tidak dilakukan uji properti). Sebelum pengujian dilaksanakan pengukuran dilakukan untuk ukuran pelat, jarak antar lubang termasuk diameter lubang baut.

Tabel 4. Benda Uji Berdasarkan Spasi Antar Baut

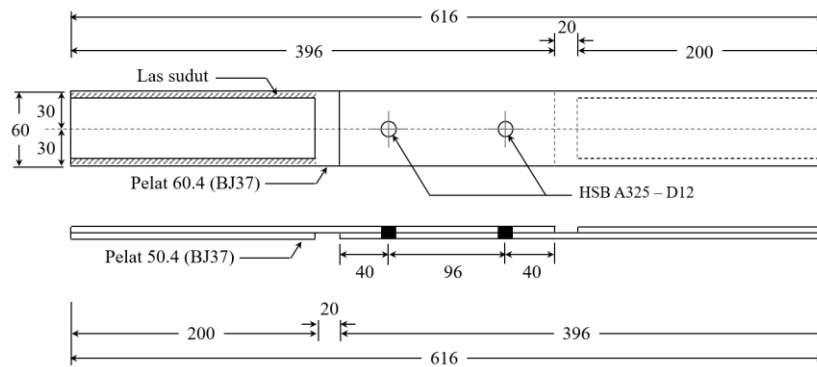
Benda uji	Ketentuan spasi antar baut	Spasi antar baut (mm)	Jumlah
1	minimum : $3 d_b$	40	3
2	menengah	70	3
3	maksimum : $24 t_p$ dan ≤ 300 mm	96	3



Gambar 3. Model Benda Uji 1



Gambar 4. Model Benda Uji 2



Gambar 5. Model Benda Uji 3

2.4 Pemberian Pra-Tarik Baut dan Penyiapan Benda Uji

Benda uji pada kondisi kencang pas (*snug tight*) dilakukan penandaan (*marking*) seperti Gambar 6 untuk selanjutnya diberikan pra-tarik melalui tambahan $\frac{1}{2}$ putaran mur yang dilakukan menggunakan kunci torsi seperti pada Gambar 7.

Karakteristik dasar kekuatan sambungan kritis-selip adalah tahanan friksi antar permukaan pelat yang timbul akibat pra-tarik baut, sehingga antar pelat yang disambung tidak bergeser satu sama lain dalam batas kekuatan kritis-selip, meskipun sesuai ketentuan lubang dibuat lebih besar dari diameter baut. *Strain gauge* yang direkatkan pada salah satu permukaan pelat seperti pada Gambar 8, akan menunjukkan mulai terjadinya pergeseran yang berarti merupakan batas kekuatan sambungan kritis-selip.



Gambar 6. *Marking* pada Benda Uji Kondisi Kencang Pas



Gambar 7. Pemberian Pra-Tarik



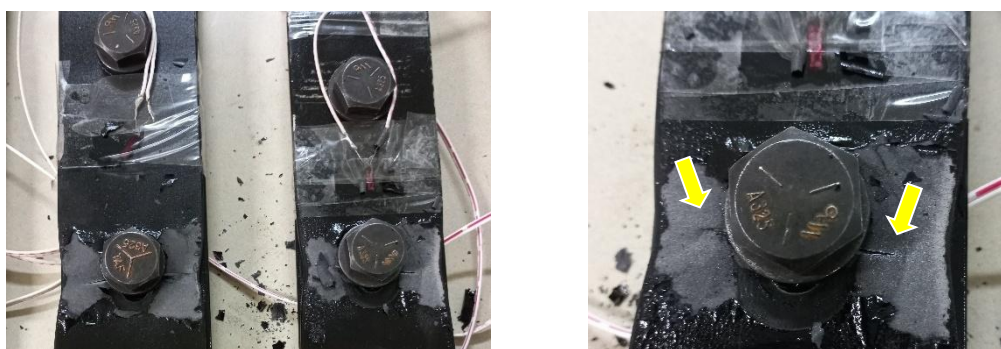
Gambar 8. *Strain Gauge* untuk Mengamati Pergeseran Antar Plat

2.5 Pengujian Sambungan Baut Kritis Selip

Benda uji yang telah terpasang pada *Universal Testing Mechine* (UTM) seperti pada Gambar 9 dan kondisi benda uji setelah pengujian terdapat pada Gambar 10 dengan model kegagalan tipikal adalah kerusakan/robekan lubang baut.



Gambar 9. Benda Uji Siap Untuk Pengujian



a. Setelah pengujian

b. Kerusakan lubang

Gambar 10. Kegagalan Tipikal Kerusakan Lubang Baut

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Pengaruh Spasi Baut pada Kekuatan Sambungan

Analisis kekuatan sambungan termasuk kekuatan pelat yang disambung dilakukan untuk ketiga model benda uji pada Gambar 3 sampai Gambar 5 dengan hasil rangkuman pada Tabel 5.

Data pelat yang disambung:

Ukuran pelat baja ($b \times t_p$) : 60 x 4 mm
Luas penampang (A_g) : 60 x 4 = 240 mm²

Pelat baja dari mutu BJ37:

Tegangan leleh (F_y) : 240 MPa
Tegangan tarik putus (F_u) : 370 MPa

Data baut penyambung HSB A325 - M12:

Diameter baut (d_b) = 12 mm
Diameter lubang (d_l) = $d_b + 2 = 14$ mm
Diameter imajiner (d_i) = $d_l + 2 = 16$ mm
Kuat geser nominal (F_{nv}) = 372 MPa (HSB A325 ulir terdapat pada bidang geser)

1. Kuat nominal leleh tarik penampang bruto pelat

$$R_n = A_g F_y = 240 \cdot 240 = \underline{57,60 \text{ kN}}$$

2. Kuat nominal keruntuhan tarik penampang neto pelat

$$R_n = A_e F_u = U A_{nt} F_u = 1 (A_g - n d_i t) F_u \\ = 1 (240 - 1 \cdot 16 \cdot 4) \cdot 370 = \underline{65,12 \text{ kN}}$$

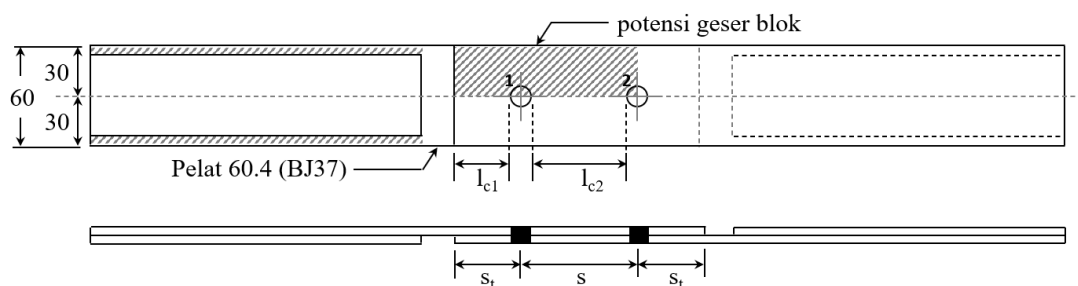
Keterangan:

U : 1 untuk pelat

n : jumlah lubang pada jalur potensi keruntuhan tarik

3. Kuat nominal retak geser blok pelat yang disambung

Kondisi batas geser blok seperti pada Gambar 11. Perhitungan dilakukan untuk model benda uji 1, yaitu: jarak tepi (s_t) 40 mm dan spasi antar baut (s) = 40 mm.



Gambar 11. Model Geser Blok Benda Uji

Kuat nominal retak geser blok:

$$R_n = 0,6 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0,6 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}$$

$$0,6 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} = 0,6 \cdot 370 (804 - 1,5 \cdot 16 \cdot 4) + 1 \cdot 370 (30 - 0,5 \cdot 16) \cdot 4 = 82,29 \text{ kN}$$

$$0,6 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} = 0,6 \cdot 240 (804) + 1 \cdot 370 (30 - 0,5 \cdot 16) \cdot 4 = \underline{78,64 \text{ kN}} \text{ (menentukan)}$$

Keterangan:

A_{gv} : luas bruto penampang yang tergeser

A_{nv} : luas neto penampang yang tergeser

A_{nt} : luas neto penampang yang tertarik

U_{bs} : untuk tegangan tarik merata bernilai 1

4. Kuat nominal grup baut sambungan kritis selip:

Kuat nominal tahanan selip untuk 1 baut:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s = 0,3 \cdot 1,13 \cdot 1 \cdot 53 \cdot 1 = 17,97 \text{ kN}$$

Keterangan:

μ : 0,3 kondisi permukaan kelas A (permukaan baja *mill scale* bersih tanpa di cat)

h_f : 1,0 kondisi tanpa *filler*

T_b : 53 kN, gaya pra-tarik baut minimum untuk diameter baut 1" (12 mm), yaitu 12 kips dengan faktor konversi ke kN sebesar 4,45

n_s : jumlah bidang selip/bidang kontak pelat yang menghasilkan tahanan friksi

Kuat nominal tahanan selip untuk 2 baut:

$$R_n = \underline{35,94 \text{ kN}}$$

5. Kuat nominal grup baut sambungan tumpu:

a. Kuat nominal geser baut:

Kuat nominal geser untuk 1 baut:

$$R_{n1} = F_{nv} A_b n_s = 372 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 12^2 \cdot 1 = 42,07 \text{ kN}$$

b. Kuat nominal tumpu baut - pelat:

$$R_{n2} = 2,4 d_b t F_u = 2,4 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 370 = 42,62 \text{ kN}$$

c. Kuat nominal robekan jalur lubang: untuk model benda uji 1 Gambar 11.

Baut 1:

$$l_{c1} = 40 - \frac{1}{2} d_i = 40 - \frac{1}{2} \cdot 16 = 32 \text{ mm}$$

Kuat nominal robekan jalur lubang:

$$R_{n3,1} = 1,2 l_{c1} t F_u = 1,2 \cdot 32 \cdot 4 \cdot 370 = 56,83 \text{ kN}$$

Baut 2:

$$l_{c2} = 40 - 2 \cdot \frac{1}{2} d_i = 40 - 16 = 24 \text{ mm}$$

Kuat nominal robekan jalur lubang:

$$R_{n3,2} = 1,2 l_{c2} t F_u = 1,2 \cdot 24 \cdot 4 \cdot 370 = 42,62 \text{ kN}$$

Kuat nominal grup baut sambungan tumpu: (nilai terkecil tiap baut, kondisi a, b dan c)

$$R_n = 42,07 + 42,07 = \underline{84,14 \text{ kN}}$$

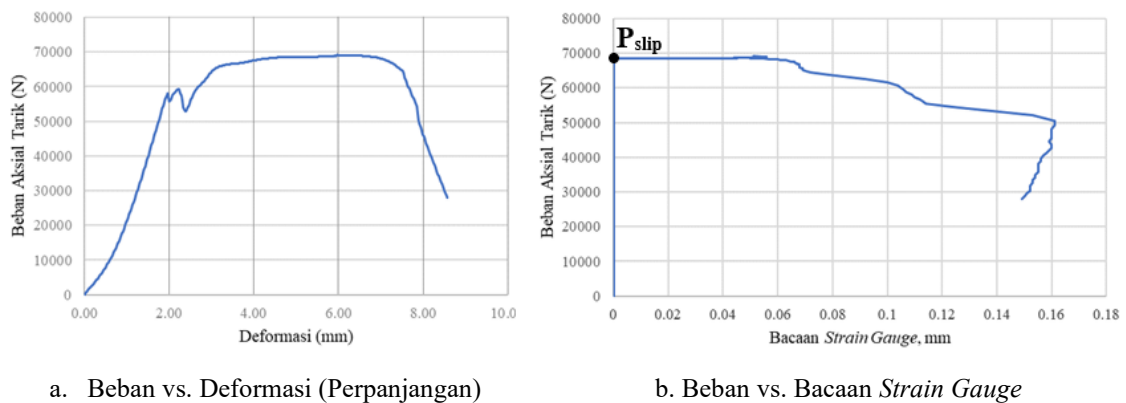
Tabel 5. Hasil Analisis Pengaruh Spasi Baut pada Kekuatan Sambungan

Kondisi Batas	Kuat Nominal (kN)		
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3
Leleh tarik	57,60	57,60	57,60
Keruntuhan tarik	65,12	65,12	65,12
Geser blok	78,64	95,92	110,90
Grup baut, mekanisme kritis selip	35,94	35,94	35,94
Grup baut, mekanisme tumpu	84,14	84,14	84,14

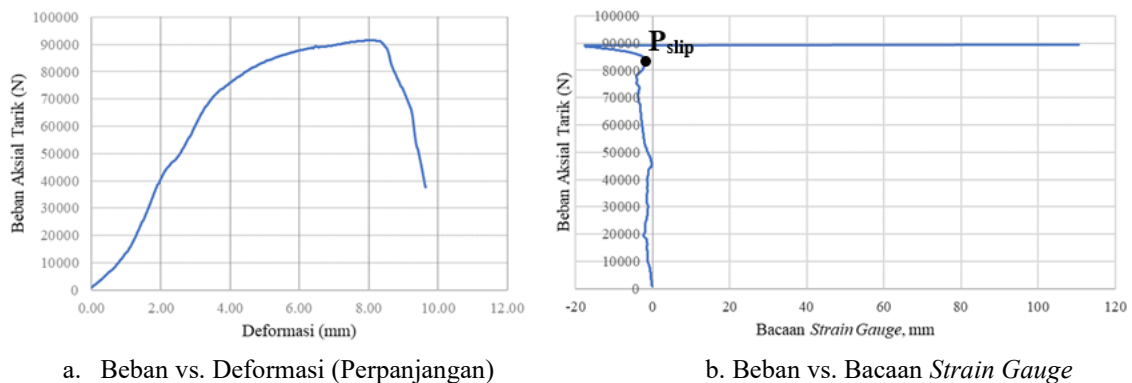
3.2 Uji Aksial Tarik Konsentris

Tujuan dari penelitian ini terutama mengamati terjadinya slip antar pelat yang disambung, namun pembebanan dilakukan sampai terjadinya kegagalan yaitu penurunan kekuatan benda uji.

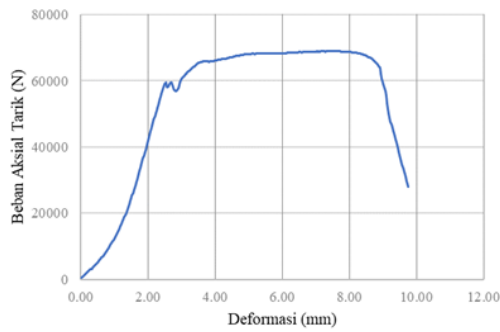
Beban dan deformasi didapat dari bacaan UTM, sementara terjadinya slip antar pelat diperoleh melalui bacaan *strain gauge* yang dipasang pada permukaan pelat. Hasil pengujian benda uji ditampilkan pada Gambar 12 sampai Gambar 20.



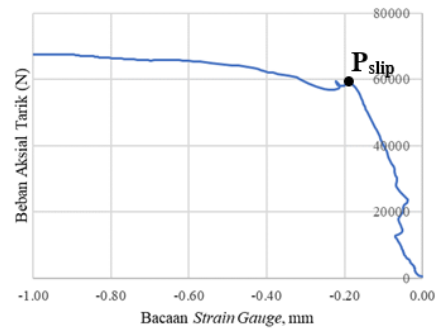
Gambar 12. Benda Uji 1A



Gambar 13. Benda Uji 1B

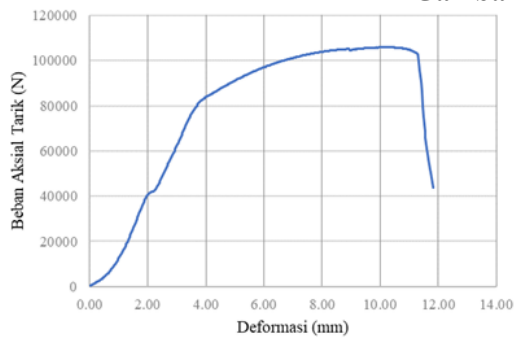


a. Beban vs. Deformasi (Perpanjangan)

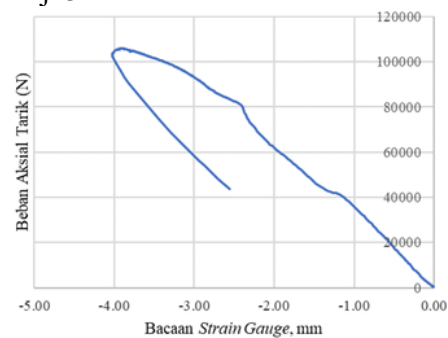


b. Beban vs. Bacaan *Strain Gauge*

Gambar 18. Benda Uji 3A

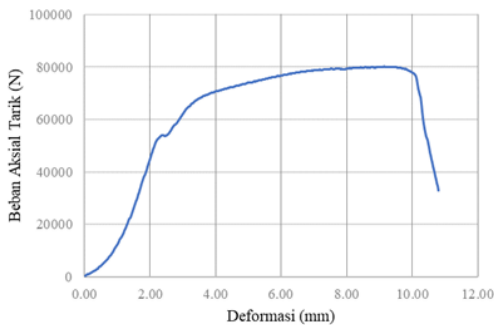


a. Beban vs. Deformasi (Perpanjangan)

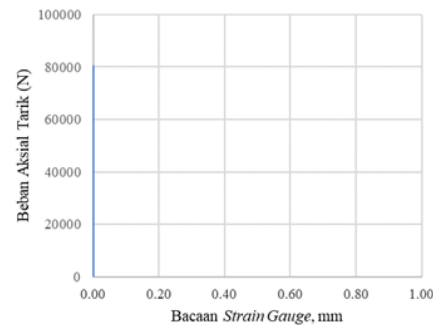


b. Beban vs. Bacaan *Strain Gauge*

Gambar 19. Benda Uji 3B



a. Beban vs. Deformasi (Perpanjangan)



b. Beban vs. Bacaan *Strain Gauge*

Gambar 20. Benda Uji 3C

Deformasi (perpanjangan) yang dicatat pada Gambar 12 sampai Gambar 20 digunakan pergerakan mesin yang dicatat oleh UTM.

Nilai beban saat slip terjadi (P_{slip}) yaitu saat terjadi lonjakan signifikan bacaan *strain gauge*, serta nilai kuat tarik dan deformasi ultimit (P_u , D_u) hasil eksperimen seperti pada Tabel 6.

Kuat nominal kritis selip hasil analitis pada Tabel 5 adalah 35,94 kN untuk ketiga model benda uji. Jika batas ini tercapai dan beban terus bertambah tidak berarti sambungan menjadi gagal, tetapi akan terjadi selip antar pelat akibat lubang yang lebih besar dari diameter badan baut dan sambungan berperilaku sebagai sambungan tumpu dengan kegagalan yang akan terjadi terlebih dahulu adalah leleh pelat pada 57,60 kN, sementara runtuh pelat pada 65,12 kN.

Tabel 6. Slip dan Kuat Tarik Ultimit Sambungan

Keterangan	P _{slip} (kN)	D _u (mm)	P _u (kN)
Model Benda Uji 1			
A	69	5,97	69,174
B	85	7,94	91,456
C	65	7,82	75,256
Rata-rata Benda Uji 1	73	7,24	78,629
Model Benda Uji 2			
A	60	5,72	61,245
B	0	9,74	85,464
C	0	8,94	97,479
Rata-rata Benda Uji 2	60	8,13	81,396
Model Benda Uji 3			
A	60	7,35	68,934
B	0	10,21	105,929
C	0	9,13	80,141
Rata-rata Benda Uji 3	60	8,90	85,001

Pada studi eksperimental, model kegagalan adalah keruntuhan tarik pelat berupa kerusakan/robekan lubang baut seperti Gambar 10 pada kisaran kuat nominal 80 kN seperti tersaji pada Tabel 6 (benda uji 1: 78,6 kN; benda uji 2: 81,4 kN; benda uji 3: 85 kN). Kegagalan leleh pelat tidak terjadi yang dapat disebabkan pendeknya bagian utuh pada masing-masing sisi benda uji, yaitu 20 mm saja seperti pada Gambar 3 sampai Gambar 5.

Mencermati hasil pengujian Gambar 12 sampai Gambar 20 secara khusus untuk bacaan *strain gauge* benda uji 2B, 2C dan 3B terlihat bahwa dari awal pembebanan bacaan *strain gauge* telah bergerak. Hal yang mungkin sebagai penyebab adalah kurang baiknya perekatan *strain gauge* pada permukaan pelat dan bukan karena dari awal pembebanan telah terjadi selip pada pelat. Untuk kondisi benda uji 3C, *strain gauge* tidak terbaca.

Kuat nominal kritis selip yang disyaratkan SNI 1729:2020 yaitu sebesar 35,94 kN seperti terdapat pada Tabel 5, dipenuhi oleh ketiga model benda uji, yaitu: 73 kN untuk benda uji 1; 60 kN untuk benda uji 2 dan benda uji 3 seperti ditunjukkan pada Tabel 6. Meskipun hasil pengujian memberikan nilai kuat nominal kritis selip melampaui yang disyaratkan, namun jika dikaitkan dengan spasi baut sesuai dengan tujuan penelitian ini, tercatat terjadi perubahan/penurunan nilai kuat nominal kritis selip untuk benda uji 1 dengan jarak spasi baut minimum (40 mm) dibanding benda uji 2 dan benda uji 3 yang memiliki spasi baut lebih besar, yaitu 70 mm dan 96 mm.

4. SIMPULAN

Dari studi analitis dan uji eksperimental di laboratorium, diperoleh simpulan berikut:

1. Tipe kritis selip disyaratkan pada beberapa sambungan, yaitu: ujung profil rangkap, struktur dengan pembebanan yang menimbulkan vibrasi dan beban dinamis. Pra-tarik pada penelitian ini menggunakan cara *turn-of-nut* dengan kunci torsi (*torque wrenches*), tambahan ½ putaran

mur dari kondisi kencang pas (*snug tight*) dan kuat nominal kritis selip yang dihasilkan adalah 73 kN untuk benda uji 1, 60 kN untuk benda uji 2 dan benda uji 3. Kesemuanya memenuhi nilai yang dianalisis menurut ketentuan yang berlaku, yaitu 35,94 kN.

2. Meskipun kuat nominal kritis selip semua benda uji melampaui hasil analitis, namun terjadi perubahan/penurunan nilainya yaitu 73 kN pada benda uji 1 dengan jarak spasi baut 40 mm menjadi 60 kN untuk benda uji dengan jarak spasi baut yang lebih besar (70 mm untuk benda uji 2 dan 96 mm untuk benda uji 3).
3. Penurunan kuat nominal dengan bertambahnya spasi baut yg merupakan titik-titik jepitan pada sambungan kritis selip, masih perlu dilakukan verifikasi lebih lanjut dikarenakan adanya bacaan *strain gauge* yang telah bergerak dari awal pembebanan (benda uji 2B, 2C, 3B) yang lebih mungkin disebabkan perekatan *strain gauge* pada permukaan benda uji yang kurang tepat, adanya bacaan *strain gauge* negatif serta adanya satu *strain gauge* benda uji 3C yang tidak terbaca.
4. Pengujian sambungan kritis selip menjadikan *strain gauge* sebagai instrument yang sangat menentukan, sehingga perlu mendapatkan perhatian khusus dan kehati-hatian dari awal pemilihan spesifikasi yang sesuai dengan sifat pengujian, cara penyimpanan, pemasangan, termasuk penguatan setelah terpasang agar *strain gauge* tidak bergeser selama pengujian.
5. Penelitian ini dapat dilanjutkan terkait kecepatan pembebanan terhadap kebutuhan pengamatan kapan saat selip mulai terjadi yang berarti tercapainya batas kekuatan sambungan kritis selip.
6. Pada penelitian yang berbasis eksperimen seperti penelitian ini, pengujian properti material perlu dilakukan untuk mengkonfirmasi mutu material yang dinyatakan dalam *mill certificate*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ANSI/AISC 360-16. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*.
- ASTM E8/E8M - 16a. (2016). *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A
- Dewobroto, W. (2016). *Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain - AISC 2010* (2nd ed.). Jurusan Teknik Sipil UPH.
- Grondin, G., Jin, M., & Josi, G. (2008). *Slip Critical Bolted Connections-A Reliability Analysis for Design at the Ultimate Limit State*.
- Gutama, A., Kurniawandy, A., & Fatra, W. (2015). Studi Eksperimental Variasi Pretension Sambungan Baut Baja Tipe Slip Critical. *Jom FTEKNIK*, 2(1Februari).
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures: Design and Behaviour - Emphasizing Load and Resistance Factor Design* (5th ed.). Pearson Education, Inc.
- Segui, W. T. (2018). *Steel Design* (6th ed.). Cengage Learning, USA.
- SNI 1729:2020 *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*.
- SNI 7860:2020 *Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*.
- SNI 7972:2020 *Sambungan Terpraktualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik*.

Sulandari, N., Pranata, A., & Kristianto, A. (2023). Analisis Sambungan Terprakualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja Tipe Pelat Sayap Berbaut (PSB) dan T Ganda. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, Pusat Publikasi Ilmiah LPPM Institut Teknologi Sepuluh Noverber, Volume 21*(No. 4), 345–354. <http://iptek.its.ac.id/index.php/jats>