

## Studi Analitis dan Eksperimental Mekanisme Slip-Kritis Sambungan Struktural Baut Baja

Noek Sulandari <sup>[1]\*</sup>, Yosafat Aji Pranata <sup>[1]</sup>, Anang Kristianto <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 40164, Indonesia

Email: [noek.sulandari@eng.maranatha.edu](mailto:noek.sulandari@eng.maranatha.edu) \*, [yosafat.ap@gmail.com](mailto:yosafat.ap@gmail.com) , [anang.kristianto@gmail.com](mailto:anang.kristianto@gmail.com)

\*) Correspondent Author

**Received:** 01 December 2022; **Revised:** 03 January 2023; **Accepted:** 25 January 2023

**How to cite this article:**

Sulandari, N., Pranata, Y. A., Kristianto, A., (2022). Studi Analitis dan Eksperimental Mekanisme Slip-Kritis Sambungan Struktural Baut Baja. Jurnal Teknik Sipil, 19(1), 158–173. <https://doi.org/10.28932/jts.v19i1.5755>

### ABSTRAK

Letak geografis Indonesia menjadikan Indonesia sebagai negara yang rawan bencana gempa baik tektonik maupun vulkanik. Standar Nasional Indonesia (SNI) 1729:2015 mensyaratkan sambungan baut bangunan baja dengan tinggi lebih dari 38 m, harus menggunakan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt – HSB*) dengan pra-tarik. Sambungan baut kencang pas (*snug tight*) dan sambungan baut dengan pra-tarik, secara kasat mata tidak berbeda. Perbedaan akan terjadi saat sambungan dibebani yaitu untuk sambungan dengan pra-tarik, slip antar pelat yang disambung sebagai akibat ukuran lubang baut yang lebih besar dari diameter baut baru akan terjadi saat kuat batas slip terlampaui. Penelitian ini bermaksud mengamati kekuatan dan perilaku sambungan baut dengan pra-tarik terhadap peningkatan beban. Analisis dilakukan menurut SNI 1729:2015, validasi data melalui uji eksperimental menggunakan benda uji pelat BJ37 yang dibebani aksial tarik konsentris. Sambungan menggunakan HSB-A325 M12, lubang standar dengan persiapan permukaan kelas A. Pemberian pra-tarik baut dengan cara putar mur (*turn-of-nut*). Hasil pengujian menunjukkan kuat batas slip ( $P_{slip}$ ) 37,998 kN, nilai ini 5,7% lebih tinggi dibanding hasil analitis sebesar 35,94 kN. Setelah tercapai kuat batas slip, sambungan tetap dapat menerima pembebanan dengan mekanisme pengalihan gaya tumpu dan mencapai kuat batas sambungan ( $P_u$ ) sebesar 50,197 kN, yang berarti masih dapat menerima peningkatan beban 32% setelah slip terjadi. Putar mur (*turn-of-nut*) salah satu metode yang direkomendasikan SNI 1729:2015, merupakan cara yang cukup sederhana untuk pemberian pra-tarik karena tidak diperlukan alat khusus dan gaya pra-tarik minimum yang disyaratkan dapat dipenuhi dengan tercapainya  $P_{slip}$  hasil eksperimen tidak lebih rendah dibandingkan dengan hasil analisis.

**Kata kunci:** *Sambungan Baut, Pre-Tension Baut, Slip-Kritis.*

**ABSTRACT.** *Analytical and Experimental Studies on Critical Slip Mechanism of Bolt Structural Steel Connection. Indonesia's geographical location makes Indonesia as a country prone to earthquake risks, both tectonic as well as volcanic. The Indonesian National Standard (SNI) 1729:2015 requires bolt connections for steel buildings with a height of more than 38 m must use high-strength bolts (HSB) with pre-tensioning. Snug-tight and pre-tensioned bolted connections are physically no different. Differences will occur when the connection is loaded, namely for pre-tensioned joints, where slip between the plates being joined as a result of the bolt hole size being larger than the bolt diameter will occur when the slip limit strength is exceeded. This study aims to observe the strength and behavior of pre-tensioned bolted joints with increasing loads. The analysis was carried out according to SNI 1729:2015, with data validation through experimental tests using BJ37 plate specimens loaded with concentric axial tension. The connection uses a HSB-A325 M12 standard hole with class A surface preparation. Pre-tension bolts are*

applied by turn-of-nut. The test results show that the strength of the slip limit ( $P_{slip}$ ) is 37.998 kN; this value is 5.7% higher than the analytical result of 35.94 kN. After reaching the slip limit strength, the connection can still accept the load with the bearing force transfer mechanism and reach the connection limit strength ( $P_u$ ) of 50.197 kN, 32% exceeding the slip limit strength. Turn-of-nut, one of the methods recommended by SNI 1729:2015, is a fairly simple method for pre-tensioning because no special additional tools are required and the required minimum pre-tensioning force can be met by achieving  $P_{slip}$  experimental results not lower than the results of the analysis.

**Keywords:** Bolt Connection, Bolt Pretension, Critical-Slip.

## 1. PENDAHULUAN

Struktur gedung yang menggunakan material baja terdiri dari elemen-elemen profil baja yang disambungkan satu dengan lainnya untuk mewujudkan satu kesatuan struktur yang dapat berfungsi sebagaimana direncanakan. Dari karakteristik tersebut, pemahaman yang tepat tentang desain sambungan struktur baja sama pentingnya dengan desain dari elemen-elemen utama struktur. Sambungan baut dengan pra-tarik antara lain diatur dalam *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts* (RCSC, 2020) mengacu pada penelitian terdahulu oleh Kulak, et. al., 1993 yang dimuat pada *Journal of Constructional Steel Research*, No. 25 dengan judul: *Field Studies of Bolt Pretension*. Studi eksperimental sambungan baut dengan kondisi kegagalan geser baut telah dilakukan (Sulandari dkk., 2017) dan untuk kondisi kegagalan tumpu baut-pelat juga telah dilakukan (Pranata dkk., 2018).

Menurut SNI 1729:2015 Sub Bab J1.10, struktur baja dengan tinggi lebih dari 38 meter yang menggunakan sambungan baut sebagai alat penyambung harus menggunakan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt*) yang diberikan pra-tarik (*pre-tension*). Model sambungan ini lebih memberikan batasan terjadinya deformasi struktur, namun dalam pelaksanaannya diperlukan tahap penyiapan bagian-bagian permukaan yang disambung serta pemberian *pre-tension* baut.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kekuatan dan perilaku (deformasi) model sambungan baut dengan *pre-tension* terhadap peningkatan beban secara eksperimen dan analitis.

Ruang lingkup penelitian adalah sebagai berikut:

1. Analisis sambungan baut dengan *pre-tension* menurut SNI 1729:2015.
2. Benda uji pelat baja BJ37, dengan alat sambung baut mutu tinggi (*High Strength Bolt*) A325-M12, lubang tipe standar, persiapan permukaan kelas A yaitu permukaan baja *mill-scale* bersih tanpa dicat.
3. Benda uji berjumlah 3 (tiga) buah untuk sambungan baut dengan *pre-tension* dan 1 buah benda uji untuk sambungan baut yang dikencangkan pas (*snug-tight*) sebagai pembanding.
4. Pemberian *pre-tension* pada baut dilakukan dengan cara putar-mur (*turn-of-nut*).

## 2. METODOLOGI

Metode penelitian dilakukan secara analitis menurut SNI 1729:2015 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural dan secara eksperimen mengacu pada ASTM E8/E8M – 16a *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Dimulai dengan melakukan studi literatur untuk mendapatkan semua ketentuan menurut standar yang berlaku.

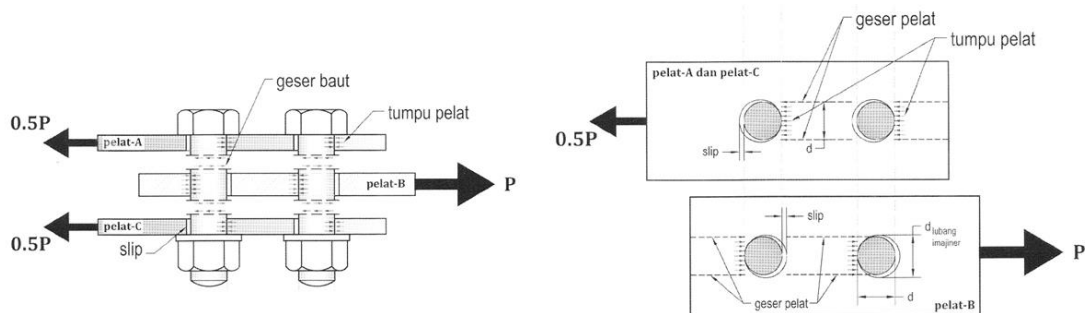
### 2.1 Alat Penyambung Baut Pada Sambungan Struktur Baja

Baut sebagai alat penyambung untuk perakitan struktur baja di lapangan cukup dapat diandalkan. Pengawasan pemasangan yang dibutuhkan relatif mudah untuk mencapai hasil yang diharapkan. Sambungan untuk elemen utama struktur baja, menggunakan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt - HSB*) antara lain kode A325 dan A490, yang dibedakan menurut kekuatannya.

### 2.2 Mekanisme Pengalihan Gaya pada Sambungan Struktur Baja

Cara pengencangan baut pada sambungan struktur baja menentukan mekanisme pengalihan gaya. SNI 1729:2015 membagi menjadi dua kelompok:

1. Pengencangan pas (*snug tight*), akibat P yang bekerja  $\perp$  sumbu baut seperti pada Gambar 1, menyebabkan geser pada badan baut. Plat A dan C bergeser ke kiri, plat B bergeser ke kanan sehingga terjadi kontak tumpu/*bearing* badan baut dan pelat pada tepi lubang baut. Pengalihan gaya ini dikenal dengan mekanisme tumpu, dapat dipilih jika pada sambungan bekerja beban statik, tanpa risiko fatik atau getaran yang dapat menyebabkan baut lepas dengan sendirinya.

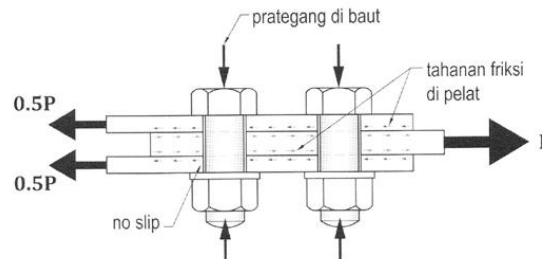


**Gambar 1.** Mekanisme Tumpu pada Cara Pengencangan *Snug Tight*

Sumber: Dewobroto, 2016

2. Pengencangan dengan pra-tarik (*pre-tension*), yaitu pengencangan sampai kondisi *snug tight* selanjutnya dilakukan langkah pemberian *pre-tension* pada baut mutu tinggi. Cara ini menghasilkan pengalihan gaya melalui mekanisme slip-kritis seperti pada Gambar 2. Akibat pra-tarik pada baut, timbul jepitan pada pelat-pelat yang disambung. Saat beban P bekerja, kuat sambungan dihasilkan dari tahanan friksi bidang kontak antar pelat. Pengencangan baut dengan pra-tarik harus dilakukan untuk kondisi sambungan ujung pada kolom yang

menggunakan profil gabungan/tarsus, sambungan kolom bangunan bertingkat dengan tinggi lebih dari 38 meter, sambungan balok-kolom dan semua balok yang pengaku kolomnya tergantung pada bangunan bertingkat dengan tinggi lebih dari 38 meter, sambungan *crane*  $\geq 5$  ton, atau sambungan dengan beban dinamis atau pemikul mesin yang menimbulkan vibrasi.



**Gambar 2.** Mekanisme Slip-Kritis pada Cara Pengencangan dengan *Pre-Tension*  
 Sumber: Dewobroto, 2016

### 2.3 Gaya dan Cara Pemberian Pra-Tarik pada Baut Mutu Tinggi

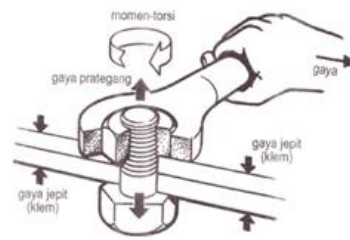
Untuk mewujudkan pengalihan gaya melalui mekanisme slip-kritis, gaya pra-tarik minimum yang dikerjakan pada baut seperti pada Tabel 1. Cara pemberian gaya pra-tarik yang direkomendasi (Segui, 2013) adalah sbb.: cara putar mur, penggunaan kunci torsi terkalibrasi, penggunaan indikator tarik langsung, dan penggunaan baut kontrol tarik tipe putar-putus.

Pada penelitian ini, gaya pra-tarik baut diberikan melalui cara putar mur (*turn-of-nut*), seperti Gambar 3. Momen torsi akan menyebabkan mur (*nut*) berputar pada ulir baut sampai akhirnya terjadilah efek jepitan (klem) antar elemen-elemen (pelat) yang disambung. Gaya jepit dan kondisi permukaan akan menimbulkan tahanan friksi saat beban bekerja. Kondisi inilah inti dari kekuatan sistem sambungan dengan mekanisme slip-kritis.

**Tabel 1.** Gaya Pra-Tarik Minimum

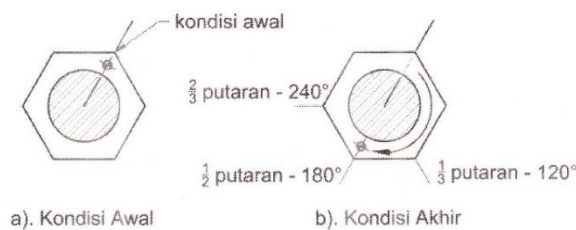
Diameter		A325 (Group A)		A490 (Group B)	
(inch)	(mm)	(kips)	(kN)	(kips)	(kN)
1/2	-	12	-	15	-
5/8	M16	19	91	24	114
3/4	M20	28	142	35	179
7/8	M22	39	176	49	221
1	M24	51	205	64	257
1 1/8	M27	64	267	80	334
1 1/4	M30	81	326	102	408
1 3/8	M36	97	475	121	595

Sumber: AISC, 2016



**Gambar 3.** Efek Jepitan pada Pengencangan Baut dengan Tambahan Putaran  
 Sumber: Dewobroto, 2016

Mengukur besar gaya pra-tarik yang diberikan pada baut tidaklah mudah, sementara parameter ini menjadi penentu tahanan friksi yang dapat dihasilkan sistem sambungan dengan mekanisme slip-kritis saat dibebani. Dari penelitian tentang pemberian pra-tarik baut dengan cara putar mur (*turn-of-nut*), meskipun cara ini sederhana tetapi terbukti gaya pra-tarik minimum baut dapat terpenuhi (RCSC, 2020). Setelah kondisi *snug-tight* tercapai, diberikan tambahan 1/2 putaran mur atau lebih seperti pada Gambar 4 serta mengikuti ketentuan Tabel 2.



**Gambar 4.** Cara Putar-Mur (*Turn-of-Nut*)  
 Sumber: Dewobroto, 2016

**Tabel 2.** 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, 2020

#### 2.4 Perhitungan Kekuatan Sambungan Baut Mekanisme Slip-Kritis

1. Kekuatan sambungan baut mekanisme slip-kritis menurut SNI 1729:2015 untuk beban yang bekerja dalam arah penampang baut atau  $\perp$  sumbu baut, dihitung mengikuti Persamaan 1.

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

Keterangan:

$R_n$  : ketahanan slip nominal yang dihasilkan penyambung

$\mu$  : koefisien slip rata-rata yang tergantung kondisi permukaan

- 0,3 permukaan kelas A (permukaan baja *mill scale* bersih tanpa di cat dan setara)  
0,5 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*  
0,85 jika digunakan 2 *filler* diantara pelat sambungan  
 $T_b$  : gaya pra-tarik baut minimum seperti disyaratkan pada Tabel 1  
untuk diameter baut 12 mm (1/2 inch),  $T_b = 12 \text{ kips} = 53 \text{ kN}$   
 $n_s$  : jumlah bidang slip/bidang kontak pelat yang menghasilkan tahanan friksi  
 $n_b$  : jumlah baut penyambung
2. Kekuatan pelat yang disambung, mengikuti kondisi batas yang menentukan.
- A. Kuat nominal leleh pada penampang utuh, mengikuti Persamaan 2.

$$R_n = A_g F_y \quad (2)$$

- B. Kuat nominal retak penampang tereduksi pada daerah sambungan, mengikuti Persamaan 3.

$$R_n = A_e F_u = U A_{nt} F_u \quad (3)$$

Keterangan:

$A_g$  : luas penampang pelat

$A_{nt}$  : luas penampang pelat tereduksi akibat lubang baut

$F_y$  : tegangan leleh pelat

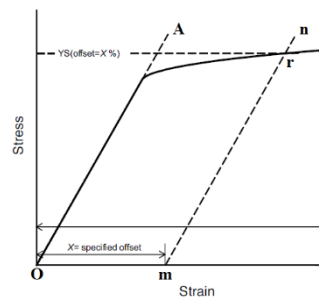
$F_u$  : tegangan tarik putus pelat

$U$  : *shear lag factor*, untuk elemen pelat  $U = 1$

## 2.5 Uji Laboratorium Sambungan Baut

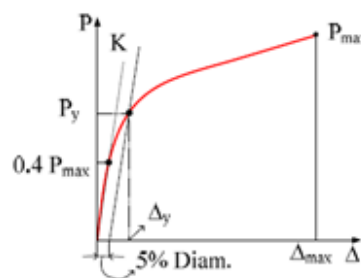
Standar yang digunakan untuk pengujian di laboratorium adalah ASTM E8/E8M – 16a *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* (ASTM, 2016). Dari pengujian didapatkan diagram hubungan antara tegangan – regangan.

ASTM E8/E8M – 16a juga memuat metode untuk menentukan kuat leleh, yaitu: salah satu yang dapat digunakan adalah metode 0,2% *offset* regangan. Pada diagram tegangan - regangan yang diperoleh dari pengujian seperti Gambar 5, tentukan jarak Om yaitu 0,2% regangan. Tarik garis lurus mn sejajar garis OA dan r adalah titik leleh yaitu perpotongan antara garis mn dengan diagram tegangan – regangan.



**Gambar 5.** Menentukan Titik Leleh Metode 0,2% *Offset* Regangan  
Sumber: ASTM, 2016

Metode lain yang dapat digunakan untuk estimasi titik leleh kurva tipikal beban – deformasi adalah metode 5% *offset* diameter. Pada Gambar 6 titik leleh adalah perpotongan garis lurus dengan kurva beban – deformasi, dimana garis lurus dengan 5% *offset* diameter penyambung sejajar garis lurus dengan kemiringan antara 0% - 40% beban puncak ( $P_{maks}$ ).



**Gambar 6.** Menentukan Titik Leleh Metode 5% *Offset* Diameter  
Sumber: Palaeowati, 2015

Penelitian yang dilakukan melalui pendekatan kuantitatif mencakup analisis menurut standar perencanaan yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 1729:2015. Selanjutnya hasil diverifikasi melalui pengujian specimen/benda uji di laboratorium.

Pada benda uji untuk sambungan dengan baut pra-tarik perlu dilakukan persiapan permukaan bidang kontak karena inti kekuatan sambungan mekanisme slip-kritis adalah tahanan friksi pada bidang tersebut. Persiapan permukaan yang dipilih adalah kelas A, yaitu permukaan baja *mill scale* bersih tanpa dicat. Selanjutnya dilakukan penyambungan dengan baut sampai kondisi *snug tight*, dilanjutkan penandaan (*marking*) dan dilakukan pemberian pra-tarik baut.

Uji eksperimental dilakukan di Laboratorium Struktur dan Beton, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha menggunakan alat uji UTM (*Universal Testing Machine*). Data primer yang diperoleh adalah beban tarik yang dikerjakan dan deformasi yang terjadi pada benda uji. Pengamatan perilaku benda uji dilakukan saat tahanan slip terlampaui serta model kegagalan yang terjadi.



### 3. HASIL DAN DISKUSI

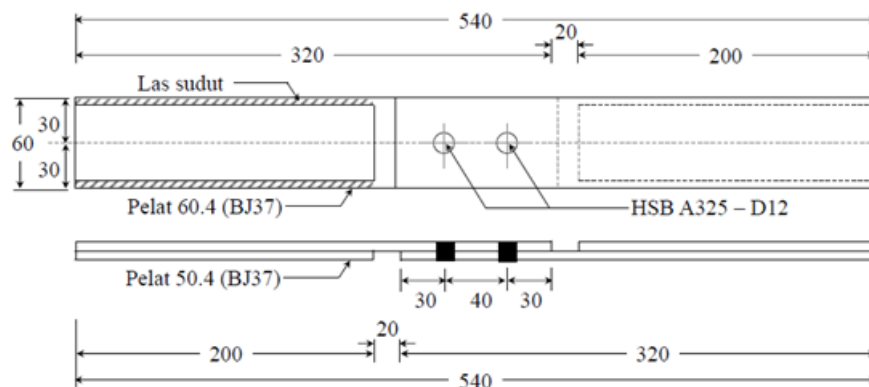
#### 3.1 Spesifikasi Benda Uji dan Analisis Menurut SNI 1729:2015

Spesifikasi bahan, ukuran dan jarak-jarak lubang baut telah memperhatikan semua ketentuan yang diatur dalam SNI 1729:2015. Skema benda uji yang digunakan seperti Gambar 7.

1. Elemen yang disambung berupa pelat ukuran 60 x 4 mm ( $A_g = 240 \text{ m}^2$ ) dari baja mutu BJ 37 ( $F_y = 240 \text{ MPa}$ ;  $F_u = 370 \text{ MPa}$ ).
2. Sambungan menggunakan 2 buah baut mutu tinggi (*High Strength Bolt – HSB*) dari grup A (A325), diameter 12 mm ( $d_b = 12 \text{ mm}$ ), ulir pada bidang geser.
3. Lubang untuk alat penyambung adalah jenis lubang standar ( $d_l = d_b + 2 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$ ).
4. Bidang permukaan yang akan disambung kelas A (permukaan *mill scale* bersih/bersih skala pabrik tanpa di cat),  $\mu = 0,3$ .
5. Sambungan tanpa pengisi (*filler*).
6. Spasi (jarak antar baut) & jarak baut ke tepi pelat yang disambung mengikuti yang ditetapkan dalam SNI 1729:2015.
7. Beban yang dikerjakan pada benda uji adalah beban aksial tarik konsentris.
8. Untuk keperluan dudukan benda uji pada UTM, dipasang 2 pelat penampang 50 x 4 mm panjang 200 mm, dilas pada tiap ujung untuk meratakan permukaan benda uji.
9. Menggunakan Persamaan 1 sampai Persamaan 3, analisis kekuatan sambungan memberikan hasil seperti pada Tabel 3.

Realisasi benda uji seperti pada Gambar 8 dan Gambar 9. Sebelum baut-baut dipasang, dilakukan pengukuran benda uji dan hasil tersaji pada Tabel 4.

Dari Tabel 4 dapat dilihat ukuran benda uji telah sesuai dengan yang direncanakan seperti pada Gambar 7. Penyambung baut yang digunakan HSB A325 diameter 12 mm dengan ulir penuh seperti pada Gambar 10.



Gambar 7. Spesifikasi Benda Uji



**Tabel 3.** Analisis Kekuatan Sambungan Slip - Kritis

Kondisi Batas	Faktor Ketahanan	Kuat Rencana (kN)
Sambungan baut mekanisme slip-kritis: $R_n = \mu D_u h_f T_b n_s n_b$	$\phi = 1,00$	35,94
Leleh pada penampang utuh pelat yg disambung: $R_n = A_g F_y$	$\phi = 0,90$	51,84
Retak penampang tereduksi daerah sambungan: $R_n = A_e F_u = U A_{nt} F_u$	$\phi = 0,75$	48,84

Sumber: SNI, 2015



a. Tampak Memanjang



b. Tampak Samping

**Gambar 8.** Benda Uji Pada Eksperimen



**Gambar 9.** Empat Benda Uji Pada Eksperimen

**Tabel 4.** Hasil Pengukuran Benda Uji.

Keterangan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Benda Uji 4
	(mm)			
Tebal pelat	3,9	4,0	3,9	3,9
Lebar pelat	60	60	60	60
Diameter lubang	14	14	14	14
Jarak lubang ke tepi pelat (jarak as lubang ke tepi pelat)	30	30	30	30
Jarak antar lubang (as ke as)	40	43,5	40	40
Jarak antar jepitan pada UTM	240	240	240	240



a. HSB A325 – M12



b. Baut Ulir Penuh

**Gambar 10.** Penyambung Baut

### 3.2 Persiapan Benda Uji

Sebelum pelat disambung, dipastikan permukaan bidang kontak dalam keadaan bersih (kondisi permukaan kelas A). Setelah disambung dengan kondisi *snug tight*, dilakukan penandaan (*marking*) seperti pada Gambar 11a. Pemberian pra-tarik baut dalam penelitian ini dilakukan dengan cara putar-mur (*turn-of-nut*). Untuk baut dengan panjang ( $L$ )  $\leq 4$  diameter baut ( $d_b$ ), dari posisi *snug tight* diberikan tambahan  $\frac{1}{2}$  putaran mur menurut ketentuan pada Tabel 2 dan hasil setelah pra-tarik baut seperti pada Gambar 11b.

Selanjutnya pada tiap benda uji dilakukan pemasangan *strain gauge* di bagian depan – belakang pelat, diantara kedua baut seperti Gambar 12 untuk memonitor pergeseran antar pelat yang disambung saat pembebanan dilakukan.



a. Penandaan (*Marking*) Posisi *Snug Tight*    b. Tambahan  $\frac{1}{2}$  Putaran Mur

**Gambar 11.** Pra-Tarik Baut Cara *Turn-of-Nut*

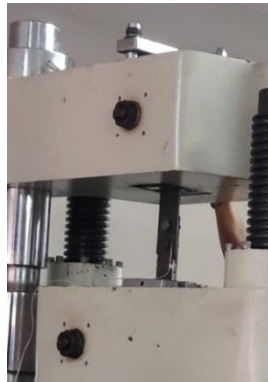


**Gambar 12.** Pemasangan *Strain Gauge* Pada Benda Uji

### 3.3 Pengujian Aksial Tarik Konsentris

Benda uji dengan *strain gauge* yang telah terpasang selanjutnya ditempatkan pada mesin UTM seperti pada Gambar 13.

Meskipun tujuan dari penelitian ini terutama mengamati terjadinya slip, tetapi pembebanan akan dilakukan sampai terjadinya kegagalan yaitu penurunan kekuatan benda uji. Kondisi benda uji pada akhir pengujian seperti pada Gambar 14.



a. Benda Uji pada Mesin UTM



b. *Strain Gauge*

**Gambar 13.** Pengujian Aksial Tarik Konsentris



a. Tipikal Kegagalan Benda Uji



b. Kerusakan Lubang Baut

**Gambar 14.** Benda Uji pada Akhir Pengujian

Dari pengujian 3 benda uji sambungan baut *pre-tension* diperoleh nilai beban ( $P_{slip}$ ) dan deformasi ( $D_{slip}$ ) saat slip mulai terjadi, yaitu saat terjadi lonjakan signifikan bacaan *strain gauge*, serta kuat tarik batas ( $P_u$ ) dan deformasi ( $D_u$ ) ke 4 benda uji seperti pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Ketahanan Slip dan Kuat Tarik Batas Sambungan

Keterangan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Benda Uji 4
$D_{slip}$ (mm)	1,68	2,78	2,77	-
$P_{slip}$ (kN)	31,981	40,014	42,000	-
$D_u$ (mm)	6,49	7,74	7,33	6,20
$P_u$ (kN)	45,810	50,880	53,900	33,800

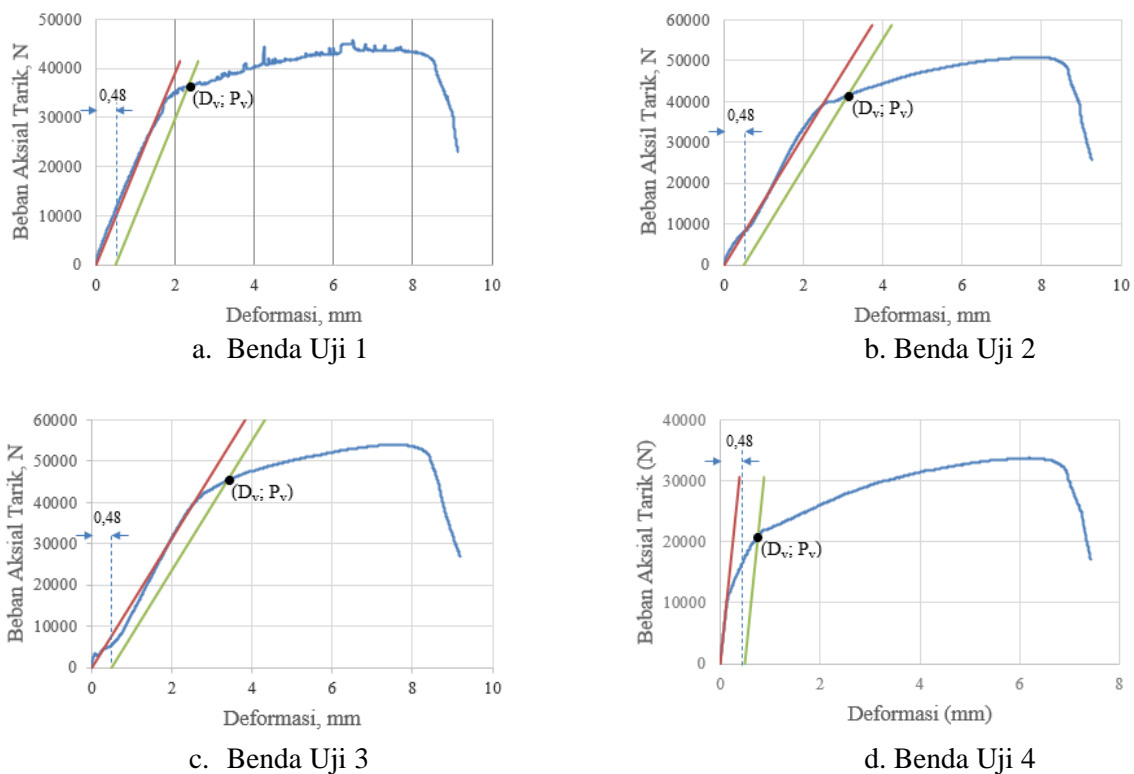
### 3.4 Menentukan Kuat Leleh

#### A. Metode 0,2% *Offset* Regangan

Kurva hubungan beban – deformasi dari uji menggunakan UTM, seperti Gambar 15. Nilai 0,2% *offset* regangan:

- panjang benda uji tidak tertambat, yaitu jarak antar garis penanda batas jepitan UTM seperti pada Tabel 4 dan Gambar 12:  $L = 240 \text{ mm}$
- $0,2\%$  *offset* regangan =  $0.002 \Delta L/L$   
 $\Delta L = 0,002 \cdot 240 = 0,48 \text{ mm}$

Selanjutnya dilakukan penggambaran pada kurva beban – deformasi Gambar 15. Titik leleh adalah perpotongan garis lurus dengan kurva, dimana garis lurus dengan *offset* 0,48 mm memiliki kemiringan sama dengan kemiringan garis singgung kurva mula-mula (sambungan pada kondisi elastis). Nilai kuat leleh sambungan untuk ke 4 (empat) benda uji terdapat pada Tabel 6.



**Gambar 15.** Penentuan Titik Leleh Metode  $0,2\%$  *Offset* Regangan

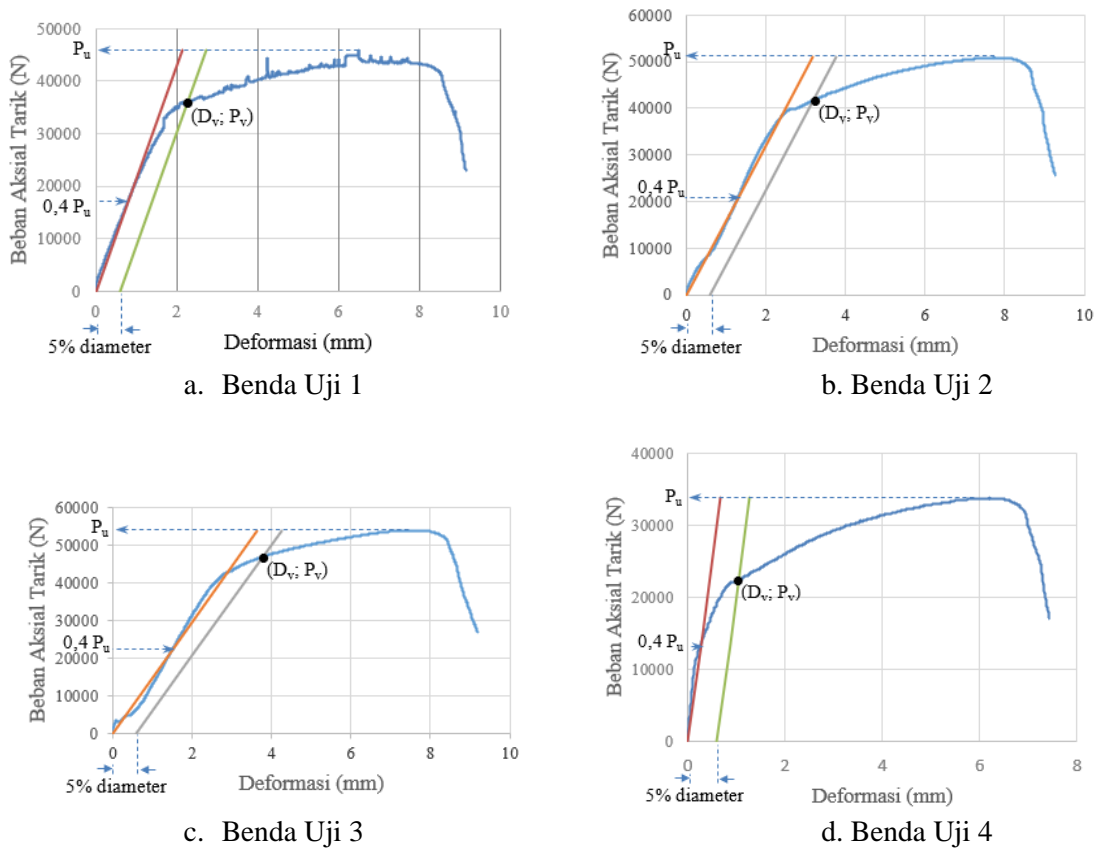
**Tabel 6.** Titik Leleh Sambungan Metode  $0,2\%$  *Offset* Regangan.

Keterangan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Benda Uji 4
$D_y$ (mm)	2,40	3,20	3,40	0,75
$P_y$ (kN)	36,370	41,749	45,400	21,000

#### B. Metode $5\%$ *Offset* Diameter

Penentuan titik leleh dengan metode ini terdapat pada Gambar 16 dan Tabel 7. Metode ini umum digunakan untuk membuat estimasi titik leleh sambungan pada pengujian di laboratorium. Pada kurva beban – deformasi, titik leleh adalah perpotongan garis lurus dengan

kurva, dimana garis lurus dengan *offset* 5% diameter penyambung memiliki kemiringan sama (sejajar) dengan kekakuan awal yaitu garis lurus dengan kemiringan antara 0% - 40% beban puncak ( $P_u$ ).



**Gambar 16.** Penentuan Titik Leleh Metode 5% *Offset* Diameter

**Tabel 7.** Titik Leleh Sambungan Metode 5% *Offset* Diameter

Keterangan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Benda Uji 4
$D_y$ (mm)	2,40	3,20	3,80	1,10
$P_y$ (kN)	36,370	41,749	46,900	22,500

Hasil pengujian laboratorium dan penggunaan metode untuk menentukan kondisi leleh sambungan, menghasilkan rangkuman pada Tabel 8. Ketiga benda uji dengan sambungan baut *pre-tension* mencapai kuat batas slip ( $P_{slip}$ ) rata-rata sebesar 37,998 kN.

Setelah kuat batas slip tercapai dan slip terjadi antar elemen pelat, sambungan akan berperilaku sebagai sambungan tumpu. Sebagai satu kesatuan, sambungan tidak kehilangan kekuatannya, hal ini ditunjukkan dengan kuat batas sambungan ( $P_u$ ) rata-rata mencapai 50,197 kN.

**Tabel 8.** Ketahanan Slip, Kuat Leleh dan Kuat Tarik Batas Sambungan Hasil Eksperimen

Keterangan	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Rata-rata	Benda Uji 4
$D_{slip}$ (mm)	1,68	2,78	2,77	2,41	-
$P_{slip}$ (kN)	31,981	40,014	42,000	37,998	-
$D_u$ (mm)	6,49	7,74	7,33	7,19	6,20
$P_u$ (kN)	45,810	50,880	53,900	50,197	33,800
Metode 0,2% <i>Offset</i> Regangan:					
$D_y$ (mm)	2,40	3,20	3,40	3,00	0,75
$P_y$ (kN)	36,370	41,749	45,400	41,173	21,000
Metode 5% Diameter:					
$D_y$ (mm)	2,40	3,20	3,80	3,13	1,10
$P_y$ (kN)	36,370	41,749	46,900	41,673	22,500

Kuat batas leleh ( $P_y$ ) sambungan yang dihitung dengan Metode 0,2% *Offset* Regangan dan Metode 5% *Offset* Diameter memberikan hasil yang mendekati, yaitu 41,173 kN dan 41,673 kN. Jika dikaitkan dengan penampang berlubang yang memiliki luas neto ( $A_{nt}$ ) sebesar 176 mm, maka:

- Metode 0,2% *Offset* Regangan: tegangan leleh ( $F_y$ ) =  $P_y/A_{nt}$  = 234 MPa.
- Metode 5% *Offset* Diameter: tegangan leleh ( $F_y$ ) =  $P_y/A_{nt}$  = 237 MPa.

Keduanya menghasilkan nilai tegangan leleh yang mendekati dengan material yang digunakan yaitu BJ 37 dengan nilai tegangan leleh ( $F_y$ ) sebesar 240 MPa.

Benda uji ke-4 dengan baut yang dikencangkan pas merupakan sambungan tipe tumpu. Kuat batas sambungan ( $P_u$ ) hasil uji sangat rendah yaitu 33,8 kN. Kuat batas leleh ( $P_y$ ) yang dihitung dengan Metode 0,2% *Offset* Regangan dan Metode 5% *Offset* Diameter memberikan hasil secara berurutan, yaitu 21 kN dan 22,5 kN, maka:

- Metode 0,2% *Offset* Regangan: tegangan leleh ( $F_y$ ) =  $P_y/A_{nt}$  = 119 MPa.
- Metode 5% *Offset* Diameter: tegangan leleh ( $F_y$ ) =  $P_y/A_{nt}$  = 128 MPa.

Keduanya menghasilkan nilai tegangan leleh yang jauh lebih rendah dari nilai yang seharusnya untuk BJ 37 yaitu sebesar 240 MPa. Hal ini menjadi cacatan yang akan datang untuk lakukan pengetesan mutu bahan selain tes benda uji sambungan, serta semua benda uji dipastikan berasal dari pelat yang sama.

### 3.5 Pembahasan Hasil Eksperimen dan Analisis Menurut SNI 1729:2015

Hasil eksperimen pada Tabel 8, memberikan nilai ketahanan slip rata-rata sebesar 37,998 kN dari 3 benda uji sambungan baut slip kritis. Jika dibandingkan dengan hasil hitung analisis menurut SNI 1729:2015 pada Tabel 3 yaitu 35,94 kN, hasil eksperimen 5,7% lebih tinggi.

Setelah tahanan slip tercapai, sebagai satu kesatuan sambungan tidak kehilangan kekuatannya. Sambungan berperilaku sebagai sambungan tumpu dan mencapai kuat batas ( $P_u$ ) rata-rata 50,197 kN, yang berarti masih dapat menerima peningkatan beban 32% setelah slip.

Memperhatikan tipikal model kegagalan pada Gambar 14, leleh yang diikuti retak terjadi pada penampang berlubang, dengan nilai kuat leleh 41,173 kN – 41,673 kN berdasarkan penentuan kedua metode (0,2% *Offset* Regangan dan 5% *Offset* Diameter). Leleh pelat pada penampang utuh tidak terjadi dikarenakan pendeknya penampang utuh benda uji, yaitu 20 mm saja seperti pada Gambar 7. Kuat leleh hasil eksperimen ini tidak dapat dibandingkan dengan hasil analisis pada Tabel 3 yaitu sebesar 51,84 kN, karena analisis menghitung kondisi batas leleh pada bagian utuh. Jika melalui penampang tereduksi secara analisis dihitung besar kuat leleh ( $P_n = A_{nt} F_y$ ), akan didapatkan  $P_n = 42,24$  kN yang tidak berbeda jauh dengan hasil hitung eksperimen.

#### **4. SIMPULAN**

Dari uji eksperimental yang telah dilakukan dan hasil analisis, diperoleh simpulan:

1. Sambungan baut *pre-tension* menghasilkan pengalihan gaya melalui mekanisme slip-kritis. Dengan spesifikasi benda uji yang digunakan, hasil pengujian memberikan nilai kuat batas slip ( $P_{slip}$ ) sebesar 37,988 kN. Nilai ini 5,7% lebih tinggi dari hasil analisis menurut SNI 1729:2015 yaitu sebesar 35,94 kN.
2. Setelah tercapai kuat batas slip, sambungan tetap dapat menerima pembebanan dengan mekanisme pengalihan gaya tumpu dan mencapai kuat batas sambungan ( $P_u$ ) sebesar 50,197 kN, yang berarti masih dapat menerima peningkatan beban 32% setelah slip terjadi.
3. Tercapainya kuat batas slip ( $P_{slip}$ ) ditentukan saat bacaan *dial gauge* menunjukkan lonjakan yang signifikan. Deformasi (perpanjangan) saat slip terjadi ( $D_{slip}$ ) adalah 2,41 mm dan saat kuat batas sambungan terjadi, deformasi ( $D_u$ ) sebesar 7,19 mm yang termasuk pergeseran antar pelat yang disambung akibat diameter lubang baut 2 mm lebih besar dari baut.
4. Putar mur (*turn-of-nut*) salah satu cara yang direkomendasikan SNI 1729:2015, merupakan cara yang cukup sederhana untuk pemberian pra-tarik baut karena tidak diperlukan alat khusus. Tambahan  $\frac{1}{2}$  putaran mur dari kondisi *snug tight* sebagai langkah *pre-tension* baut (Salmon, 2020; RCSC, 2020) dapat mewujudkan pra-tarik minimum yang disyaratkan.
5. Cara putar mur meskipun sederhana, memerlukan kecermatan dan kejujuran dalam pelaksanaan, yaitu: tahap penyiapan permukaan bidang kontak sambungan, pengencangan *snug tight*, penandaan dan penambahan putaran mur. Cara manual ini menjadi tidak realistis jika diterapkan pada skala proyek konstruksi sebenarnya yang melibatkan penyambung baut dalam jumlah yang sangat banyak. Perlu dipilih metode lain dengan penggunaan alat bantu yang dapat menghasilkan gaya pra-tarik secara presisi dan cepat.



6. Dalam penyiapan di bengkel, perlu dipastikan benda uji dibuat/dipotong dari pelat yang sama. Uji *specimen* bahan dapat dilakukan untuk memastikan mutunya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Kristen Maranatha, sebagai pemberi dana penelitian. Artikel ini merupakan bagian dari luaran penelitian pendanaan internal Skema B Tahun Anggaran 2020 Universitas Kristen Maranatha, Bandung.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- AISC (2016), *Specification for Structural Steel Building (ANSI/AISC 360-16)*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, July 2016.
- ASTM (2016), *ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, American Society for Testing and Material.
- Dewobroto, W. (2016), *Struktur Baja: Perilaku, Analisis & Desain - AISC 2010 Edisi ke-2*, Jurusan Teknik Sipil UPH, Lippo Karawaci, Tangerang.
- McCormac, Jack C., Csernak, Stephen F. (2012), *Structural Steel Design 5<sup>th</sup> Edition*, Pearson Education, Inc.
- Palaeowati, N., Awaludin, A., Siswosukarto, S. (2015), *Lateral Load Resistance of Laminated Vaneer Lumber Sengonwooden Joints with Wooden Dowels*, Makara Journal of Technology 18(3):143.
- Pranata, Y.A., Sulandari, N., Milyardi, R. (2018), *Experimental Tests and Analytical Studies of Bearing-Type Axial Steel Connection*, MATEC Web of Conferences 215, 01030.
- RCSC (2020), *Specification for Structural Joints Using High Strength Bolts*, Research Council on Structural Connections, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- Salmon, Charles G., Johnson, John E., Malhas, Faris A. (2020), *Steel Structures: Design and Behaviour - Emphasizing Load and Resistance Factor Design 6<sup>th</sup> Edition*, Pearson Education, Inc.
- Segui, William T. (2013), *Steel Design 5<sup>th</sup> Edition*, Cengage Learning, USA.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 1729. (2015), *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 8458. (2017), *Metode Uji Pengencangan Baut Mutu Tinggi*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Sulandari, N., Milyardi, R., Pranata, Y.A. (2017), *Studi Eksperimental dan Analitis Kapasitas Sambungan Baja Batang Tarik dengan Tipe Kegagalan Geser Baut*, Jurnal Teknik Sipil, Volume 13 Nomor 1, April 2017.