Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi
Vol 12 No. 2, Oktober 2026
P-ISSN : 2477-5029
E-ISSN : 2502-0498

Perbandingan Analitis Kapasitas Desain Sambungan Tipe Tumpu dan Tahanan Slip Desain Sambungan Baut M16 pada Empat Tipe Lubang

Mardis Darwis[*1], Risha Utami[2], Bahdin Ahad Badia[3]
[1] Progam Studi D-III Teknologi Sipil, Politeknik Tridaya Virtu Morosi, Konawe, Indonesia
[2] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Patompo, Indonesia
[3]JurusanTeknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia
e-mail: ***1 mardisdrwis88@gmail.com**

Abstrak

Lubang baut yang lebih longgar daripada lubang standar memudahkan ereksi baja, tetapi besarnya penurunan tahanan slip akibat pelonggaran itu belum selalu dinyatakan secara terukur dalam praktik perencanaan. Penelitian ini merupakan studi parametrik analitis berbasis ketentuan SNI 1729:2015 dengan metode LRFD pada satu geometri sambungan pelat geser, yaitu pelat tebal 16 mm, empat baut M16 dengan pratarik minimum 91 kN, dan profil H 200×200×8×12. Empat tipe lubang ditinjau: standar (STD), berukuran lebih (OVS), slot pendek (SSL), dan slot panjang (LSL). Kapasitas desain sambungan tipe tumpu dihitung untuk STD, sedangkan tahanan slip desain dihitung untuk keempat tipe lubang dengan STD slip-kritis sebagai pembanding utama. Di antara kondisi batas yang diperiksa, kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD ditentukan oleh geser baut sebesar 224,27 kN. Dengan pratarik dan koefisien slip yang sama (μ = 0,30), tahanan slip desain empat baut adalah 123,40 kN untuk STD dan SSL tegak lurus gaya, 104,89 kN untuk OVS dan SSL sejajar gaya (15% di bawah STD), 86,38 kN untuk LSL tegak lurus gaya (30%), dan 74,04 kN untuk LSL sejajar gaya (40%). Selisih tersebut berasal dari faktor ketahanan, bukan dari perubahan gaya jepit atau koefisien slip. Pemeriksaan tumpu, robek tepi, dan penampang neto pelat pada semua tipe lubang menghasilkan nilai di atas 224,27 kN. Sebagai indeks terpisah, tahanan slip desain setara 33–55% dari kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD; penyetaraan aritmetis terhadap 224,27 kN memerlukan 8–13 baut, tanpa pemeriksaan tata letak dan kondisi batas pada jumlah baut tersebut, sehingga angka itu bukan rekomendasi desain. Kenaikan μ dari 0,30 menjadi 0,50 menaikkan semua tahanan slip desain sebesar 67% pada persamaan yang sama.

Kata kunci*—sambungan baut; tipe lubang baut; slip-kritis; tumpu; LRFD*

Abstract

Bolt holes larger than the standard size ease steel erection, but the resulting loss of slip resistance is not always quantified in design practice. This study is an analytical parametric investigation based on the provisions of SNI 1729:2015 (LRFD) for one shear-tab geometry: a 16 mm plate, four M16 bolts with a minimum pretension of 91 kN, and an H 200×200×8×12 section. Four hole types are considered: standard (STD), oversized (OVS), short-slotted (SSL), and long-slotted (LSL). The design capacity of the bearing-type connection is computed for STD only, whereas the design slip resistance is computed for all four hole types, with slip-critical STD as the primary reference. Among the limit states examined, the design capacity of the STD bearing-type connection is governed by bolt shear at 224.27 kN. With identical pretension and slip coefficient (μ = 0.30), the design slip resistance of four bolts is 123.40 kN for STD and for SSL perpendicular to the load, 104.89 kN for OVS and for SSL parallel to the load (15% below STD), 86.38 kN for LSL perpendicular to the load (30%), and 74.04 kN for LSL parallel to the load (40%). These differences come from the resistance factor alone, not from any change in clamping force or slip coefficient. Plate bearing, tear-out, and net-section checks for all hole types give values above

224.27 kN. As a separate index, the design slip resistance equals 33–55% of the design capacity of the STD bearing-type connection; matching 224.27 kN arithmetically would take 8–13 bolts, but the bolt layout and limit states for that number of bolts were not checked, so this figure is not a design recommendation. Raising μ from 0.30 to 0.50 increases every design slip resistance by 67% in the same equation.

Keywords—*bolted connection; bolt hole type; slip-critical; bearing; LRFD*

1. PENDAHULUAN

Sambungan menyalurkan gaya antarelemen pada struktur baja, sehingga kapasitasnya ikut menentukan keandalan struktur secara keseluruhan. Pada sambungan geser, kapasitas dibatasi oleh kondisi batas terkecil di antara geser baut, tumpu pelat, robek pada tepi pelat, dan geser blok [1]–[3]. Baut mutu tinggi menyalurkan gaya dengan dua cara. Pada sambungan tipe tumpu, gaya berpindah melalui kontak antara batang baut dan dinding lubang. SNI 1729:2015 [4] memperbolehkan baut sambungan semacam ini dikencangkan hingga kondisi *snug-tight* selama pratarik penuh tidak diwajibkan oleh ketentuan lain (Pasal J3.1), dan itulah asumsi pengencangan yang berlaku pada model STD dalam tulisan ini. Pada sambungan slip-kritis, baut diberi pratarik minimum sehingga bidang kontak terjepit dan gaya mula-mula dipikul oleh gesekan; sambungan ini tetap harus memenuhi kondisi batas tipe tumpu seandainya slip terjadi [4].

Literatur tentang ambang slip berfokus pada gaya pratarik dan kondisi bidang kontak. Pengaruh pratarik dan koefisien gesek terhadap kapasitas slip dan leleh ditelaah pada sambungan rangka jembatan baja [5], sedangkan pengaruh jenis permukaan, material, dan prosedur uji terhadap faktor slip dikaji secara eksperimental [6]–[9]. Koefisien slip ternyata tidak seragam: untuk jenis permukaan yang sama, nilai yang dilaporkan berkisar 0,15–0,6 dan persyaratan standar tidak selalu konservatif [10]. Kekakuan kontak tangensial dan histeresis gesekan pada antarmuka sambungan baut dibahas oleh [11], sedangkan kehilangan pratarik akibat beban siklik maupun waktu dapat menurunkan tahanan slip [12], [13].

Kelompok studi lain mengukur tahanan setelah baut menumpu dinding lubang. Tumpu pelat dipengaruhi oleh jarak ujung dan jarak antarbaut [3], [14]–[16] serta gaya pratarik baut [17]; pada baja mutu tinggi, ketentuan AISC 360-16 dapat melebihkan tahanan tumpu, sedangkan Eurocode 3 dan GB 50017-2017 lebih konservatif [14]. Kedua kelompok studi berbeda dalam respons yang diukur: kelompok pertama menetapkan awal slip pada bidang kontak, kelompok kedua menetapkan tahanan setelah pelat menumpu pada baut, sehingga hasilnya tidak dapat dibandingkan secara langsung.

Pengaruh tipe lubang terhadap tahanan lebih jarang dibahas. SNI 1729:2015 mengatur lubang berukuran lebih (*oversized*, OVS), slot pendek (*short-slotted*, SSL), dan slot panjang (*long-slotted*, LSL) dengan syarat pemakaian dan faktor ketahanan slip yang bergantung pada tipe lubang serta orientasi slot terhadap gaya [4]. Pada rujukan yang ditelaah, lubang slot muncul dalam kajian elemen hingga sambungan berpratarik dengan lubang slot panjang, yang melaporkan bahwa kenaikan pratarik dari 30% ke 70% memperbaiki tahanan slip secara nyata, sedangkan kenaikan kapasitas geser kecil dan tidak bertambah lagi setelah M24 karena lubang yang lebih besar melemahkan tumpu [18], serta dalam kajian kehilangan pratarik pada sambungan slot untuk peredam friksi [13]. Perbandingan kuantitatif keempat tipe lubang pada satu geometri yang sama belum ditemukan dalam rujukan yang ditelaah.

Tulisan ini bukan kajian eksperimental baru. Kontribusinya adalah studi parametrik berbasis ketentuan desain yang menahan pratarik, koefisien slip, jumlah baut, dan tata letak baut tetap, lalu memvariasikan tipe dan orientasi lubang. Berbeda dari [18], yang menelaah satu tipe lubang (slot panjang) melalui simulasi elemen hingga, dan dari [5], yang memvariasikan pratarik dan koefisien gesek, penelitian ini mengisolasi pengaruh tipe lubang: karena gaya jepit dan koefisien slip dibuat sama, selisih tahanan slip antartipe lubang pada model berasal dari faktor ketahanan yang ditetapkan standar. Nilai tambah praktisnya ada tiga: (a) selisih tahanan slip

desain keempat tipe lubang terhadap STD pada satu geometri dapat dibaca langsung; (b) pemeriksaan tumpu, robek tepi, dan penampang pelat untuk setiap tipe lubang menunjukkan apakah kondisi batas kekuatan menjadi pembatas; dan (c) perbandingan terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu disajikan terpisah dari pengaruh geometri lubang, sehingga tidak tercampur dengan perbedaan kondisi batas.

Penelitian ini dirumuskan dalam dua pertanyaan yang dijawab secara terpisah. Pertanyaan pertama: bagaimana tipe dan orientasi lubang mengubah tahanan slip desain sambungan slip-kritis pada geometri, pratarik, dan koefisien slip yang sama? Pertanyaan kedua: bagaimana tahanan slip desain tersebut dibandingkan dengan kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD pada geometri yang sama? Pertanyaan pertama dijawab dengan membandingkan seluruh tipe lubang terhadap STD slip-kritis, sedangkan pertanyaan kedua dijawab dengan rasio terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Penelitian dan Istilah

Penelitian bersifat analitis-komparatif tanpa pengujian fisik. Seluruh perhitungan memakai metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD): kekuatan desain φR_n tiap komponen harus sama dengan atau melebihi kekuatan perlu, dan kapasitas desain sambungan adalah nilai terkecil dari kondisi batas yang diperiksa [4]. Gaya yang ditinjau adalah gaya aksial tarik. Perhitungan dikerjakan dengan lembar hitung Calcpad, dan penelusuran langkah hitung utama ditunjukkan pada Lampiran A.

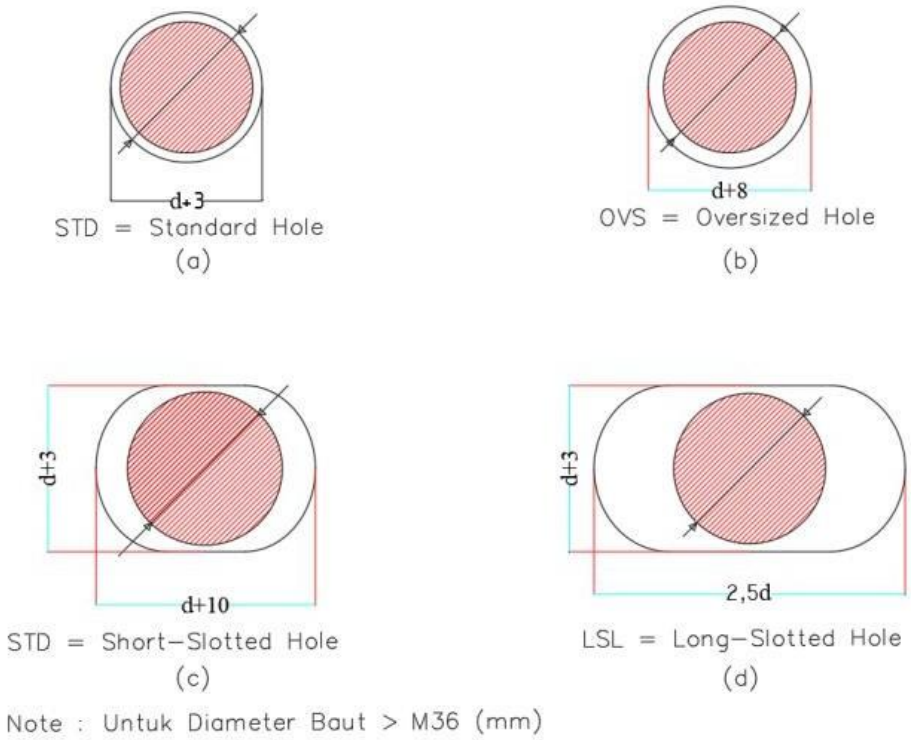
SNI 1729:2015 dipilih sebagai acuan karena seluruh masukan hitungan diambil dari edisi ini dan tersusun pada lembar hitung yang sama, yaitu dimensi lubang (Tabel J3.3), jarak ujung dan penambahan jarak tepi C_2 (Tabel J3.4 dan J3.5), pratarik minimum baut (Tabel J3.1), tegangan geser nominal baut (Tabel J3.2), dan faktor ketahanan slip (Pasal J3.8). SNI 1729:2015 mengadopsi ANSI/AISC 360-10, sedangkan edisi revisinya, SNI 1729:2020 [19], mengadopsi ANSI/AISC 360-16. Parameter utama yang menentukan hasil di sini, yaitu dimensi lubang M16, pratarik 91 kN, koefisien slip Kelas A 0,30, faktor D_u = 1,13, dan faktor φ_h pada Tabel 3, perlu diverifikasi ulang terhadap edisi 2020, termasuk nomor pasal dan tabelnya, sebelum hasil dipakai pada proyek.

Tiga istilah dipakai secara konsisten karena merujuk pada besaran yang berbeda. Tahanan slip desain (φR_{slip}) adalah tahanan geser akibat gesekan pada sambungan slip-kritis sebelum slip terjadi, dihitung dengan persamaan (3) dan (4). Kapasitas desain sambungan tipe tumpu ($\varphi R_{n,sambungan}$) adalah nilai terkecil dari kondisi batas kekuatan sambungan, yaitu geser baut, tumpu dan robek tepi pelat, geser blok, serta leleh dan fraktur tarik pada elemen yang disambung. Tahanan tumpu pelat ($\varphi R_{n,tumpu}$) hanya satu dari kondisi batas tersebut, yaitu tumpu dan robek tepi pelat di sekitar lubang baut.

Empat tipe lubang dibandingkan, yaitu STD, OVS, SSL, dan LSL (Tabel 1 dan Gambar 1). Sambungan STD dianalisis dengan dua cara: sebagai sambungan tipe tumpu untuk memperoleh kapasitas desain sambungan, dan sebagai sambungan slip-kritis untuk memperoleh tahanan slip desain yang menjadi pembanding utama bagi tipe lubang lain. Sambungan OVS, SSL, dan LSL dianalisis sebagai slip-kritis karena lubang longgar lazim dipakai pada mekanisme tersebut. Dengan cara ini, pengaruh tipe lubang (tahanan slip STD terhadap OVS, SSL, dan LSL) terpisah dari pengaruh mekanisme penyaluran gaya (tahanan slip terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu).

Tabel 1. Dimensi nominal lubang baut (mm) [4]

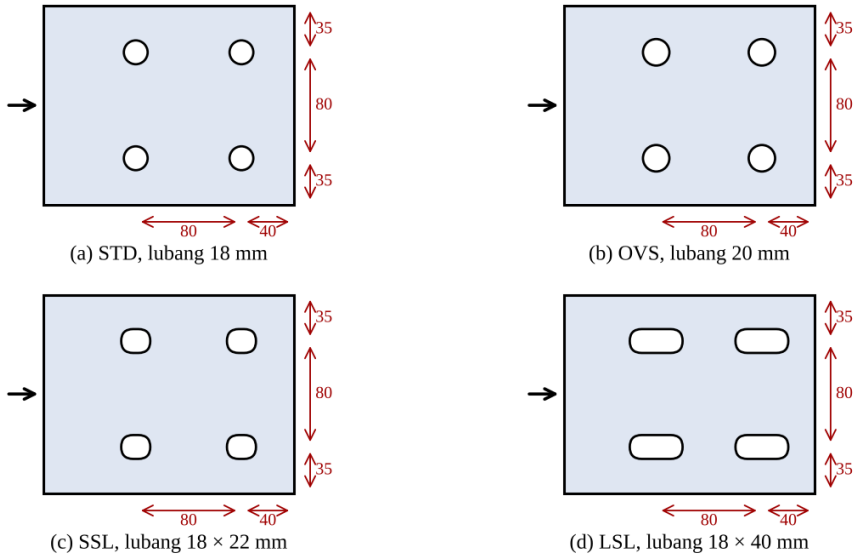
Diameter baut	STD	OVS	SSL	LSL
M16	18	20	18 × 22	18 × 40
M20	22	24	22 × 26	22 × 50
M22	24	28	24 × 30	24 × 55
M24	27	30	27 × 32	27 × 60
M27	30	35	30 × 37	30 × 67
M30	33	38	33 × 40	33 × 75
≥ M36	d + 3	d + 8	(d + 3) × (d + 10)	(d + 3) × 2,5d



Gambar 1. Tipe lubang baut: (a) STD, (b) OVS, (c) SSL, dan (d) LSL (diadaptasi dari [4])

2.2 Model Sambungan dan Data Masukan

Model berupa sambungan pelat geser (*shear tab*) yang dilas sudut 6 mm pada profil H 200×200×8×12. Pelat sambung setebal 16 mm dan selebar 150 mm dihubungkan dengan empat baut mutu tinggi M16 yang tersusun dua baris dan dua kolom (Gambar 2). Searah gaya, jarak ujung 40 mm dan jarak antarbaut 80 mm; tegak lurus gaya, jarak antarbaris 80 mm dan jarak tepi 35 mm. Gaya tarik diasumsikan bekerja melalui titik berat kelompok baut sehingga tidak ada eksentrisitas dan keempat baut memikul gaya yang sama. Tata letak sama untuk keempat tipe lubang; hanya bentuk lubang yang berubah. Jarak ujung dan jarak tepi memenuhi syarat minimum untuk semua tipe lubang: minimum 22 mm untuk STD dan, untuk lubang lain, minimum tersebut ditambah C_2 yang terbesar 0,75d = 12 mm pada LSL sehingga menjadi 34 mm, lebih kecil daripada 35 mm dan 40 mm yang dipakai. Data masukan dirangkum pada Tabel 2.



Gambar 2. Tata letak sambungan pelat geser pada profil H 200×200×8×12 (satuan mm); tata letak sama untuk keempat tipe lubang, dengan sumbu panjang slot digambarkan sejajar gaya

Tabel 2. Data masukan perhitungan

Parameter	Simbol	Nilai
Luas bruto profil H 200×200×8×12	A_g	6.353 mm²
Luas neto profil H (lembar hitung)	A_n	5.921 mm²
Tegangan leleh dan tarik profil	f_y, f_u	250 MPa, 410 MPa
Tegangan leleh dan tarik pelat (t = 16 mm)	f_y, f_u	240 MPa, 370 MPa
Lebar pelat sambung	b_p	150 mm
Jarak ujung; jarak antarbaut (searah gaya)	e; s	40 mm; 80 mm
Jarak tepi (tegak lurus gaya)	—	35 mm
Diameter dan luas baut M16	d_b, A_b	16 mm, 200,96 mm²
Tegangan geser nominal baut	F_{nv}	372 MPa
Pratarik minimum baut M16	T_b	91 kN
Jumlah baut; bidang geser	n; n_s	4; 1
Koefisien slip (permukaan Kelas A)	μ	0,30
Faktor pratarik dan pengisi	D_u; h_f	1,13; 1,0

2.3 Prosedur Perhitungan

Kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD adalah nilai terkecil dari tujuh kondisi batas yang diperiksa: leleh dan fraktur tarik profil H, leleh dan fraktur tarik pelat, geser blok pelat, geser baut, serta tumpu dan robek tepi pelat. Leleh tarik dihitung pada luas bruto (φ = 0,90) sesuai ketentuan elemen tarik (Pasal D2 dan J4.1), karena leleh terjadi sepanjang elemen dan tidak dikendalikan oleh penampang yang berlubang. Luas neto dipakai hanya untuk fraktur pada luas neto efektif A_e (φ = 0,75). Pada profil H, $A_e = 0{,}8A_n$ dengan A_n = 5.921 mm². Pada pelat, $A_e = A_n$

= (b_p − Σ(lebar lubang + 2 mm)) t dan tidak melebihi 0,85A_g. Geser blok pelat (φ = 0,75) diambil dari lembar hitung. Tahanan geser empat baut dihitung dengan persamaan (1).

$$\varphi R_{n,baut} = 0{,}75\, F_{nv}\, A_b\, n \tag{1}$$

Tahanan tumpu dan robek tepi pelat dihitung per baut dengan persamaan (2) menurut Pasal J3.10 untuk kondisi deformasi lubang pada beban layan diperhitungkan, lalu dijumlahkan dan dikalikan φ = 0,75. Pada LSL dengan sumbu panjang tegak lurus gaya, faktor 1,2 dan 2,4 diganti dengan 1,0 dan 2,0. Jarak bersih L_c diukur searah gaya dari tepi lubang ke tepi lubang terdekat atau ke tepi pelat; pada slot yang sejajar gaya, L_c mengecil sebesar panjang slot.

$$R_n = 1{,}2\, L_c\, t\, F_u \le 2{,}4\, d_b\, t\, F_u \tag{2}$$

Tahanan slip nominal satu baut dihitung dengan persamaan (3) menurut Pasal J3.8, lalu dikalikan faktor ketahanan φ_h untuk tipe dan arah lubang (Tabel 3) dan jumlah baut pada persamaan (4).

$$R_{n,slip} = \mu\, D_u\, h_f\, T_b\, n_s \tag{3}$$

$$\varphi R_{slip} = n\, \varphi_h\, R_{n,slip} \tag{4}$$

Tabel 3. Faktor ketahanan slip φ_h menurut tipe lubang (Pasal J3.8) [4]

Tipe lubang	**Arah sumbu panjang slot terhadap gaya**	**φ_h**
STD	–	1,00
SSL	tegak lurus	1,00
OVS	–	0,85
SSL	sejajar	0,85
LSL	tegak lurus	0,70
LSL	sejajar	0,60

Perbandingan dinyatakan dengan dua rasio yang dipisahkan. Rasio terhadap tahanan slip STD pada persamaan (5) hanya mencerminkan pengaruh tipe dan orientasi lubang; karena pratarik dan μ sama, nilainya sama dengan φ_h. Rasio terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu pada persamaan (6) dipakai sebagai indeks terpisah. Jumlah baut ekuivalen pada persamaan (7) hanya membagi kapasitas tersebut dengan tahanan slip desain satu baut dan membulatkannya ke atas.

$$\rho_{STD} = \varphi R_{slip} \,/\, \varphi R_{slip,STD} \tag{5}$$

$$\rho = \varphi R_{slip} \,/\, \varphi R_{n,sambungan} \tag{6}$$

$$n_{eq} = \lceil\, \varphi R_{n,sambungan} \,/\, (\varphi_h\, R_{n,slip}) \,\rceil \tag{7}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kapasitas Desain Sambungan Tipe Tumpu Lubang Standar

Tabel 4 menunjukkan tujuh kondisi batas yang diperiksa. Geser baut menentukan dengan φR_n = 224,27 kN, atau 56,07 kN per baut. Kondisi batas terkecil berikutnya adalah fraktur penampang neto pelat (488,40 kN), 2,18 kali lebih besar, disusul leleh tarik pelat (518,40 kN), tumpu dan robek tepi pelat (671,33 kN), geser blok (731,71 kN), dan kondisi batas pada profil H yang lebih besar lagi. Di antara kondisi batas yang diperiksa, mata rantai terlemah adalah baut, bukan pelat atau profil. Kesimpulan ini terbatas pada kondisi batas dalam Tabel 4: las sudut 6

mm, elemen pendukung tempat baut dipasang, dan eksentrisitas di luar asumsi konsentris tidak diperiksa dalam penelitian ini (Subbab 3.7).

Tabel 4. Kondisi batas sambungan tipe tumpu berlubang standar (STD)

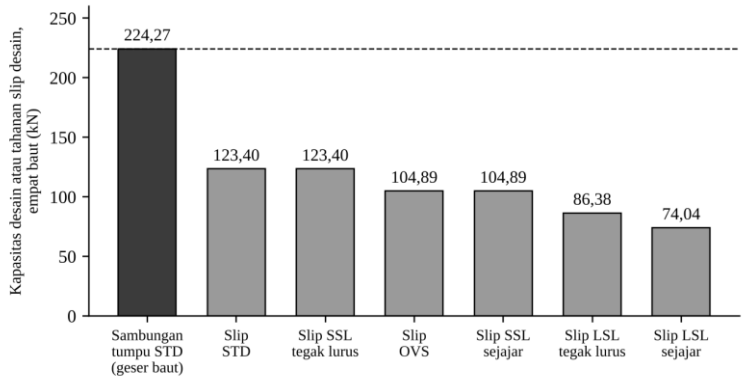
Kondisi batas	Elemen	φR_n (kN)	Dasar luas	Keterangan
Leleh tarik	Profil H	1.429,42	A_g = 6.353 mm²	
Fraktur tarik	Profil H	1.456,57	A_e = 4.736,8 mm²	
Leleh tarik	Pelat	518,40	A_g = 2.400 mm²	
Fraktur tarik	Pelat	488,40	A_e = 1.760 mm²	
Geser blok	Pelat	731,71	—	
Geser baut (4 baut)	Baut	224,27	A_b = 200,96 mm²	menentukan
Tumpu dan robek tepi (4 baut)	Pelat	671,33	L_c 31 dan 62 mm	

3.2 Tahanan Slip Desain Menurut Tipe Lubang

Dengan μ = 0,30, D_u = 1,13, h_f = 1,0, T_b = 91 kN, dan n_s = 1, tahanan slip nominal satu baut adalah 30,85 kN (persamaan 3). Tabel 5 dan Gambar 3 memperlihatkan bahwa tahanan slip desain empat baut berkisar 74,04–123,40 kN. Karena pratarik dan koefisien slip sama untuk semua tipe lubang, perbandingan dilakukan terhadap STD slip-kritis sebesar 123,40 kN, sehingga selisih yang terbaca hanya berasal dari tipe dan orientasi lubang. SSL dengan sumbu panjang tegak lurus gaya memberi tahanan yang sama dengan STD (φ_h = 1,00). OVS dan SSL sejajar gaya memberi 104,89 kN, atau 15% di bawah STD. LSL tegak lurus gaya memberi 86,38 kN (30% di bawah STD) dan LSL sejajar gaya 74,04 kN (40% di bawah STD). Selisih ini berasal dari faktor ketahanan φ_h yang ditetapkan standar untuk lubang longgar, sedangkan koefisien slip permukaan tetap sama; model ini tidak menghitung perubahan kondisi kontak pada lubang tersebut.

Tabel 5. Tahanan slip desain empat baut menurut tipe lubang dan selisihnya terhadap STD

Lubang	Slot	Kelonggaran (mm)	φ_h	$\varphi_h R_{n,slip}$ (kN/baut)	φR_{slip} (kN, 4 baut)	Selisih terhadap STD (%)
STD	—	2	1,00	30,85	123,40	0
SSL	tegak lurus	6	1,00	30,85	123,40	0
OVS	—	4	0,85	26,22	104,89	−15
SSL	sejajar	6	0,85	26,22	104,89	−15
LSL	tegak lurus	24	0,70	21,59	86,38	−30
LSL	sejajar	24	0,60	18,51	74,04	−40



Gambar 3. Kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD dan tahanan slip desain empat baut menurut tipe lubang; garis putus menandai kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD

3.3 Pemeriksaan Kondisi Batas Kekuatan pada Lubang Longgar

Setelah slip terjadi, sambungan berlubang longgar bergeser hingga baut menumpu dinding lubang, sehingga kondisi batas kekuatan tetap harus diperiksa [4]. Tabel 6 memuat tahanan tumpu dan robek tepi pelat (persamaan 2) serta fraktur penampang neto pelat untuk semua tipe lubang pada geometri yang sama. Jarak bersih L_c mengecil bila sumbu panjang slot sejajar gaya: pada LSL sejajar gaya, L_c baut ujung tinggal 20 mm dibandingkan 31 mm pada STD, sehingga tahanan tumpu dan robek tepi turun dari 671,33 kN menjadi 554,11 kN. Pada LSL tegak lurus gaya, L_c sama dengan STD, tetapi faktor tumpu lebih kecil (1,0 dan 2,0), sehingga hasilnya 559,44 kN. Lubang yang melebar tegak lurus gaya juga mengurangi penampang neto pelat: fraktur neto turun dari 488,40 kN (STD) menjadi 293,04 kN pada LSL tegak lurus gaya, yaitu 40% lebih rendah dan merupakan nilai terkecil dalam pemeriksaan tambahan ini. Seluruh nilai pada Tabel 6 tetap di atas 224,27 kN, sehingga geser baut tetap menjadi pembatas di antara kondisi batas yang diperiksa, dengan margin terkecil 1,31 kali pada LSL tegak lurus gaya. Geser blok untuk lubang longgar tidak dihitung ulang (Subbab 3.7).

Tabel 6. Tumpu dan robek tepi serta fraktur neto pelat menurut tipe lubang (empat baut)

Lubang	Slot	L_c ujung (mm)	L_c dalam (mm)	$\varphi R_{n,tumpu}$ (kN)	A_n pelat (mm²)	φR_n fraktur neto (kN)	Terkecil / 224,27
STD	—	31	62	671,33	1.760	488,40	2,18
OVS	—	30	60	660,67	1.696	470,64	2,10
SSL	sejajar	29	58	650,02	1.760	488,40	2,18
SSL	tegak lurus	31	62	671,33	1.632	452,88	2,02
LSL	sejajar	20	40	554,11	1.760	488,40	2,18
LSL	tegak lurus	31	62	559,44	1.056	293,04	1,31

3.4 Perbandingan terhadap Kapasitas Desain Sambungan Tipe Tumpu dan Jumlah Baut Ekuivalen

Sebagai indeks yang terpisah dari pengaruh geometri lubang, Tabel 7 membandingkan tahanan slip desain empat baut dengan kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD sebesar 224,27 kN. Tahanan slip desain berada pada 33–55% dari kapasitas tersebut. Kedua besaran mewakili kondisi batas yang berbeda: tahanan slip mencegah gelincir pada bidang kontak, sedangkan geser baut adalah kondisi batas kekuatan, sehingga rasio ini hanya indeks dan bukan ukuran keamanan. Jumlah baut ekuivalen pada Tabel 7 diperoleh dengan membagi 224,27 kN dengan tahanan slip desain satu baut dan membulatkannya ke atas: 8 baut untuk STD dan SSL tegak lurus gaya, 9 untuk OVS dan SSL sejajar gaya, 11 untuk LSL tegak lurus gaya, dan 13 untuk LSL sejajar gaya. Angka 8–13 ini hanya hasil penyetaraan aritmetis terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu empat baut. Tata letak, jarak antarbaut dan jarak tepi, kondisi batas kekuatan, serta biaya pemasangan untuk jumlah baut tersebut tidak dievaluasi, sehingga angka itu belum merupakan rekomendasi desain.

Tabel 7. Rasio tahanan slip desain terhadap kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD dan jumlah baut ekuivalen

Tipe lubang dan arah slot	φR_{slip} (kN, 4 baut)	ρ	n_{eq}
STD	123,40	0,55	8
SSL tegak lurus	123,40	0,55	8
OVS dan SSL sejajar	104,89	0,47	9
LSL tegak lurus	86,38	0,39	11
LSL sejajar	74,04	0,33	13

3.5 Sensitivitas terhadap Koefisien Slip dan Pratarik

Tahanan slip desain dapat diubah melalui koefisien slip dan pratarik pada persamaan (3), sebagaimana pengaruh keduanya dilaporkan dalam literatur [5], [6], [18]. Tabel 8 menghitung ulang tahanan slip desain dengan μ = 0,50, nilai Kelas B pada ketentuan slip-kritis, misalnya untuk permukaan yang dibersihkan dengan *blasting* atau diberi pelapis Kelas B. Karena $R_{n,slip}$ sebanding dengan μ, tahanan naik 67% pada semua tipe lubang (rasio 0,50/0,30). Sambungan STD kemudian mencapai 92% dari 224,27 kN, dan LSL sejajar gaya pada μ = 0,50 (123,40 kN) sama dengan STD pada μ = 0,30. Hasil ini adalah perhitungan sensitivitas: kenaikan μ hanya berlaku bila nilainya didukung pengujian permukaan, mengingat sebaran μ yang lebar dalam literatur [10], dan pratarik harus dijaga dari kehilangan akibat beban siklik dan waktu [12], [13].

Sensitivitas terhadap pratarik dihitung dengan T_b = 142 kN, yaitu pratarik minimum baut M20, sementara geometri lain tetap. Tahanan slip desain STD menjadi 192,55 kN, atau 1,56 kali (142/91), karena persamaan (3) linear terhadap pratarik. Kenaikan 1,56 kali ini murni berasal dari perubahan pratarik dalam persamaan tersebut. Baut M20 tidak diajukan sebagai alternatif desain, sebab pemakaiannya menuntut dimensi lubang, jarak ujung dan tepi, serta kondisi batas kekuatan (geser baut, tumpu, dan penampang pelat) yang dihitung ulang dan tidak dicakup di sini.

Tabel 8. Tahanan slip desain empat baut (kN) pada dua nilai koefisien slip

Tipe lubang dan arah slot	**μ = 0,30**	**ρ**	**μ = 0,50**	**ρ**
STD	123,40	0,55	205,66	0,92
SSL tegak lurus	123,40	0,55	205,66	0,92
OVS dan SSL sejajar	104,89	0,47	174,81	0,78
LSL tegak lurus	86,38	0,39	143,96	0,64
LSL sejajar	74,04	0,33	123,40	0,55

3.6 Implikasi bagi Ereksi

Manfaat lubang longgar terletak pada kelonggaran ereksi. Sepanjang sumbu panjang lubang, kelonggaran terhadap baut M16 adalah 2 mm (STD), 4 mm (OVS), 6 mm (SSL), dan 24 mm (LSL), sehingga LSL memberi ruang penyesuaian 12 kali STD. Pada model ini, ruang penyesuaian itu disertai tahanan slip desain 40% lebih rendah bila sumbu panjang slot sejajar gaya (Tabel 5). Pada STD, selisih 2 mm membuat sambungan sulit disesuaikan bila elemen baja tidak pas di lapangan, misalnya saat memasang pertemuan kolom dan balok. Pemilihan tipe lubang dengan demikian merupakan pertukaran antara toleransi ereksi dan tahanan slip desain. Bila tahanan slip desain yang tersedia mencukupi gaya yang ditinjau, OVS atau SSL dapat dipakai; bila tidak, lubang longgar menuntut tinjauan baut tambahan, pratarik lebih tinggi, atau permukaan dengan μ lebih besar. Dampak biaya pelaksanaan dari opsi-opsi tersebut tidak dievaluasi dalam penelitian ini.

3.7 Keterbatasan

Hasil ini murni analitis untuk satu geometri, satu diameter baut (M16), satu tebal pelat, dan permukaan Kelas A, sehingga belum divalidasi dengan eksperimen atau simulasi elemen hingga. Beberapa hal belum diperiksa: (i) las sudut 6 mm antara pelat dan profil H serta elemen pendukung tempat baut dipasang; (ii) eksentrisitas kelompok baut, karena gaya diasumsikan bekerja melalui titik berat kelompok baut; (iii) geser blok pada lubang longgar, yang dapat berkurang karena lubang yang memanjang searah gaya memperkecil luas geser neto; dan (iv) kehilangan pratarik selama umur layan, yang dapat menurunkan tahanan slip [12], [13]. Selain itu, selisih tahanan slip antartipe lubang pada model ini berasal dari faktor ketahanan standar, bukan dari gesekan yang diukur, sehingga tidak memuat pengaruh fisik lain dari lubang longgar.

4. KESIMPULAN

1. Di antara kondisi batas yang diperiksa, kapasitas desain sambungan tipe tumpu berlubang standar (empat baut M16, pelat 16 mm, profil H 200×200×8×12) ditentukan oleh geser baut sebesar 224,27 kN. Kondisi batas terkecil berikutnya adalah fraktur penampang neto pelat sebesar 488,40 kN, sedangkan tumpu dan robek tepi pelat (671,33 kN) dan geser blok (731,71 kN) lebih besar.
2. Pada geometri, pratarik, dan koefisien slip yang sama, tahanan slip desain empat baut adalah 123,40 kN untuk STD dan SSL tegak lurus gaya, 104,89 kN untuk OVS dan SSL sejajar gaya (15% di bawah STD), 86,38 kN untuk LSL tegak lurus gaya (30%), dan 74,04 kN untuk LSL sejajar gaya (40%). Lubang yang lebih longgar tidak selalu menurunkan tahanan slip, karena hasilnya bergantung pada tipe lubang dan orientasi slot; selisih pada model ini berasal dari faktor ketahanan.
3. Tumpu, robek tepi, dan fraktur penampang neto pelat pada semua tipe lubang tetap lebih besar daripada 224,27 kN (terkecil 293,04 kN pada LSL tegak lurus gaya), sehingga pada geometri ini pelat tidak menjadi pembatas di antara kondisi batas yang diperiksa.
4. Sebagai indeks terpisah, tahanan slip desain setara 33–55% dari kapasitas desain sambungan tipe tumpu STD. Penyetaraan aritmetis memerlukan 8–13 baut, tetapi angka ini bukan rekomendasi jumlah baut; tata letak, kondisi batas kekuatan, dan biaya pemasangan pada jumlah baut tersebut belum dievaluasi.
5. Pada perhitungan sensitivitas, $\mu = 0{,}50$ menaikkan tahanan slip desain sebesar 67% dan pratarik baut M20 menaikkannya 1,56 kali; keduanya merupakan sensitivitas persamaan tahanan slip, bukan alternatif desain yang telah diperiksa.
6. Temuan bersifat analitis untuk konfigurasi yang dianalisis. Las, eksentrisitas, dan geser blok pada lubang longgar perlu diperiksa, dan hasil perlu divalidasi, sebelum dipakai sebagai dasar desain.

5. SARAN

Penelitian lanjutan sebaiknya (1) memvalidasi hasil dengan pengujian atau analisis elemen hingga [5], [20]; (2) memvariasikan diameter baut, tebal pelat, jumlah baut, dan jarak tepi, termasuk memeriksa tata letak untuk jumlah baut ekuivalen; (3) meninjau perlakuan permukaan dan kehilangan pratarik [10]; (4) memeriksa las dan geser blok pada lubang longgar; serta (5) memverifikasi nomor pasal dan tabel terhadap SNI 1729:2020 [19].

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. D. Elliott, L. H. Teh, and A. Ahmed, “Behaviour and strength of bolted connections failing in shear,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 153, pp. 320–329, 2019.
[2] M. D. Elliott and L. H. Teh, “Whitmore tension section and block shear,” *J. Struct. Eng.*, vol. 145, no. 2, Art. no. 04018250, 2019.
[3] P. Može, “Bearing strength at bolt holes in connections with large end distance and bolt pitch,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 147, pp. 132–144, 2018.
[4] Badan Standardisasi Nasional, *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, SNI 1729:2015, Jakarta, Indonesia, 2015.
[5] R. N. Tologana, A. Triwiyono, and D. Sulistiyo, “Effect of bolt preload and friction coefficient on slip capacity and yield in steel truss bridge connections,” *ASTONJADRO*, vol. 14, no. 4, pp. 1303–1318, 2025, doi: 10.32832/astonjadro.v14i4.19267.
[6] M. Mahmoudi, M. Kosari, M. Lorestani, and M. Jalili Sadr Abad, “Effect of contact surface type on the slip resistance in bolted connections,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 166, Art. no. 105943, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105943.

[7] A. W. Lacey, W. Chen, H. Hao, and K. Bi, "Experimental and numerical study of the slip factor for G350-steel bolted connections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 158, pp. 576–590, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.04.012.

[8] B. Zheng, J. Wang, Y. Gu, G. Shu, J. Xie, and Q. Jiang, "Experimental study on stainless steel high-strength bolted slip-resistant connections," *Eng. Struct.*, vol. 231, Art. no. 111778, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111778.

[9] E. Maiorana, P. Zampieri, and C. Pellegrino, "Experimental tests on slip factor in friction joints: Comparison between European and American standards," *Fract. Struct. Integr.*, no. 43, pp. 205–217, 2018.

[10] L. Collini, R. Garziera, A. Corvi, and G. Cantarelli, "Slip strength of COR-TEN and Zn-coated steel preloaded bolted joints," *Results Eng.*, vol. 22, Art. no. 102009, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102009.

[11] D. Li, D. Botto, R. Li, C. Xu, and W. Zhang, "Experimental and theoretical studies on friction contact of bolted joint interfaces," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 236, Art. no. 107773, 2023.

[12] N. Fric, M. Veljković, Z. Mišković, and D. Buđevac, "Experimental investigation of preload losses in high strength bolts under cyclic loading," *Građevinar*, vol. 73, no. 5, pp. 453–468, Jun. 2021, doi: 10.14256/jce.3157.2021.

[13] M. D'Antimo, M. Latour, G. F. Cavallaro, J. P. Jaspart, S. Ramhormozian, and J. F. Demonceau, "Short- and long-term loss of preloading in slotted bolted connections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 167, Art. no. 105956, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105956.

[14] G. Li, Y. Lyu, and Y. Wang, "State-of-the-art on resistance of bearing-type bolted connections in high strength steel," *Front. Struct. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 569–585, 2020, doi: 10.1007/s11709-020-0607-6.

[15] Y. F. Lyu, Y. B. Wang, G. Q. Li, and J. Jiang, "Numerical analysis on the ultimate bearing resistance of single-bolt connection with high strength steels," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 153, pp. 118–129, 2019.

[16] Y. B. Wang, Y. F. Lyu, G. Q. Li, and J. Y. R. Liew, "Bearing-strength of high strength steel plates in two-bolt connections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 155, pp. 205–218, 2019.

[17] Y. F. Lyu, G. Q. Li, Y. B. Wang, H. Li, and Y. Z. Wang, "Effect of bolt pre-tension on the bearing behavior of high strength steel connections," *Eng. Struct.*, vol. 241, Art. no. 112491, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112491.

[18] A. Silva de Carvalho, T. Bogdan, J.-F. Demonceau, F. Ljubinković, A. Kozma, L. Simões da Silva, and C. Odenbreit, "Parametric finite element study of preloaded joints with long slotted holes," *ce/papers*, 2026, doi: 10.1002/cepa.70142.

[19] Badan Standardisasi Nasional, *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, SNI 1729:2020, Jakarta, Indonesia, 2020.

[20] R. Grzejda, "Finite element modeling of the contact of elements preloaded with a bolt and externally loaded with any force," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 393, Art. no. 113534, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.cam.2021.113534.

[21] Aji, A. A., Badia, B. A., Putra, M. I., Putra, F. C., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Simanjuntak, R. A. H., "Optimasi Parameter Pembubutan Baja AISI 1045 Menggunakan Metode Taguchi," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 11, no. 2, pp. 247-257, Oct. 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13719.

[22] Asiri, M. H., Husen, M., Badia, B. A., & Syafrun, M., "Studi Kekuatan Sambungan Las Terhadap Material Baja TRS 500 Menggunakan Variasi Gerakan Elektroda," Jurnal Polimesin, vol. 18, no. 2, pp. 82-90, 2020. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1828

[23] Badia, B. A., Asiri, M. H., & Husen, M., "Analisa Variasi Gerakan Elektroda pada Hasil Las Bahan Baja Karbon Rendah (ST37) Terhadap Sifat Mekanik," Jurnal Po-limesin, vol. 19, no. 1, pp. 53-60, 2021. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i1.1912.

[24] Aji, A. A., Cesar Putra, F., Badia, B. A., Idris Putra, M., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Hasudungan Simanjuntak, R. A. (2025). Analysis Of The Effect Of Machining Variables On Surface Roughness and Vibration Amplitude in Turning AlSi 1045 Steel Using The Taguchi Method. PHENOMENON : Multidisciplinary Journal Of Sciences and Research, 3(01), 53–62. https://doi.org/10.62668/phenomenon.v3i1.1406

[25] R. A. H. Simanjuntak, M. Darwis, R. Utami, B. A. Badia, and F. C. Putra, "A systematic review of manual and equipment-based demolition techniques for low-rise buildings: Technical performance, safety implications, and method selection criteria," Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi, vol. 12, no. 1, 2026. [Online]. Available: http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/15217

[26] A. Kadir and B. A. Badia, "Rancang Bangun Belt Konveyor Rotary Untuk Penga-yakan Pasir", Kapalamada, vol. 4, no. 04, pp. 755–766, Dec. 2025

[27] F. C. Putra, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. A. Gamsir, "Pengaruh Cross Feed dan Ukuran Grit Silicon Carbide Wheel Grinder Terhadap Respon Getaran dan Kekasaran Permukaan Untuk Material Baja (Hardened Tool Steel) OCR12VM," J. Mekan. Inov. Teknol., vol. 10, no. 1, pp. 343-354, Apr. 2024, doi: 10.35308/jmkn.v10i1.9385.