

KAJIAN SHEAR LAG PADA SAMBUNGAN TARIK BAJA PROFIL WF DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Erlangga Rizqi Fitriansyah^{1*}, Suci Putri Elza, ST., MT.²

¹) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana
Jl. Raya, RT.4/RW.1, Meruya Selatan, Jakarta, 11650

²) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana
Jl. Raya, RT.4/RW.1, Meruya Selatan, Jakarta, 11650

^{*})email: erlangga@mercubuana.ac.id

Diterima : 10 Maret 2023
Direvisi : 21 Mei 2021

Disetujui : 25 Mei 2023
Diterbitkan : 31 Mei 2023

Abstract: In almost all steel structures there is a weakening in the joint area, which is commonly referred to as joint efficiency. There are various factors of the attenuation, one of which is very important is the phenomenon of shear lag. This phenomenon occurs as a result of not all sections of the profile section being attached to the connection (rivets, bolts, or welds) hence there will be an increase in stress on the profile section that is attached by the connection. This shear lag condition has been stated in the AISC 360-22 standard which was taken based on the research [1]. In this research, experimental test was conducted. Until now, phenomenon of shear lag is still being researched and the formula is refined using various methods, such as studies in [2]–[6]. This study conducted trials on steel WF600x300, WF400x200 and WF300x150. Where all three are installed gussets with a connection on the web with the same connection length. Tensile testing using finite element method was carried out with the help of the Ansys software. From this test, it was found that the reduction factor of the tensile strength was reduced 0.58; 0.49; and 0.41 respectively. This result is only about 71% of the resolution on the AISC 360-22 standard [7].

Keywords : steel structure, finite element analysis, joint efficiency, WF steel, shear lag

Abstrak: Hampir pada seluruh struktur baja terdapat pelemahan pada daerah sambungannya, yang biasa disebut sebagai efisiensi sambungan. Terdapat berbagai faktor dari pelemahan tersebut, diantaranya yang sangat penting adalah fenomena *shear lag*. Fenomena ini terjadi akibat dari tidak seluruh bagian penampang profil disertakan sambungan (paku keling, baut, atau las) sehingga akan terjadi peningkatan tegangan pada bagian profil yang disertai sambungan. Kondisi *shear lag* ini sudah tercantum dalam standar AISC 360-22 yang diambil berdasarkan penelitian [1]. Pada penelitian tersebut dilakukan dengan uji eksperimen. Hingga saat ini, fenomena *shear lag* masih terus diteliti dan disempurnakan formulanya dengan berbagai metode, seperti pada penelitian [2]–[6]. Pada penelitian ini melakukan uji coba pada baja WF600x300, WF400x200 dan WF300x150. Dimana ketiganya dipasang pelat buhul (*gusset*) dengan sambungan pada bagian web dengan panjang sambungan yang sama. Pengujian tarik dengan metode elemen hingga dilakukan dengan bantuan perangkat Ansys. Dari uji ini didapat besarnya faktor reduksi kuat tariknya adalah berturut-turut tiap ukuran 0,58; 0,49; dan 0,41. Hasil ini hanya sekitar 71 % dari ketentuan pada standar AISC 360-22 [7].

Kata kunci : struktur baja, analisa elemen hingga, efisiensi sambungan, profil WF, shear lag

1. PENDAHULUAN

Dari berbagai faktor yang dapat mempengaruhi performa dari struktur baja, di antaranya adalah pada bagian sambungan. Hampir pada seluruh struktur baja terdapat pelemahan pada daerah sambungannya,

yang biasa disebut sebagai *joint efficiency*. Faktor ini merupakan fungsi dari kelenturan material, spasi antar baut, konsentrasi tegangan pada daerah lubang-lubang baut, prosedur dari proses fabrikasi, serta fenomena yang dikenal sebagai *shear lag* [8].

Fenomena *shear lag* terjadi pada saat beberapa elemen pada seluruh penampang profil baja tidak tersambung, sebagai contoh adalah apabila pada sambungan profil WF dimana hanya bagian badan (*web*) saja yang tersambung dengan *frame* lainnya (dapat dilihat pada **Gambar 1**). Sebagai dampak dari sambungan tersebut adalah timbulnya tegangan yang berlebih pada area yang tersambung, sedangkan pada sisi lain, bagian yang tidak tersambung tidak sepenuhnya mengalami tegangan. Untuk mengurangi dampak pelemahan ini, dapat dilakukan dengan memperbanyak area sambungan dari sambungan baja.



Gambar 1. *Shear Lag* pada Sambungan profil WF

Penelitian utama yang telah diangkat ke dalam AISC 360-22 [7] berasal penelitian [1] yang dilakukan secara eksperimental. Dari penelitian tersebut didapat rumusan besarnya luas efektif dari berbagai studi kasus profil yang berbeda, tergantung dari bentuk profil, posisi dan panjang sambungan. Beberapa penelitian lanjutan juga terus dilakukan hingga saat ini, diantaranya adalah dengan melakukan studi eksperimen, analisa numerik dengan metode elemen hingga, serta kombinasi dari keduanya.

Fenomena *shear lag* pada baja diantaranya dilakukan pada [2] yang meneliti *in-plane shear lag effect*, yaitu adanya perbedaan panjang sambungan las yang berbeda pada kedua tepi dari baja siku. Dari penelitian tersebut kemudian diajukan prosedur perhitungan *shear lag* untuk kasus tersebut. Artikel [3] meneliti fenomen *shear lag* pada baja mutu tinggi profil siku yang disambung baut dan las. Artikel [4] meneliti shear lag yang terjadi pada baja siku yang disambung dengan las pada kedua tepi kakinya sehingga baja profil akan menghadap ke bawah.

Selain baja normal dan baja mutu tinggi, terdapat juga penelitian *shear lag* pada baja ringan atau *cold-formed*. Pada penelitian [5], [9] meneliti baja jenis ini yang dilakukan secara eksperimental, dimana hasilnya dibandingkan dengan standar untuk baja ringan yaitu *American Iron and Steel Institute* (AISI).

Sebagian besar dari penelitian-penelitian tersebut dilakukan secara numerik dengan metode elemen hingga. Beberapa juga dilakukan dengan eksperimental dan diakhiri dengan metode numerik pula sebagai validasi seperti pada penelitian [3]

Hal yang akan dilakukan pada penelitian ini cukup mirip dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada [6], dimana objek penelitian merupakan profile WF, hanya saja posisi sambungan berbeda dengan penelitian sebelumnya. Penelitian sebelumnya mengamati *shear lag* dengan posisi sambungan pada sayap profil WF, sedangkan para penelitian ini sambungan dipasang pada bagian badan dari profil. Pada penelitian sebelumnya menggunakan sambungan baut, sedangkan pada penelitian ini akan diasumsikan terikat sempurna sehingga tidak ada pengurangan kapasitas dari lubang baut.

2. METODE PENELITIAN

Instrumen yang dipakai adalah dengan menggunakan Ansys sebagai perangkat lunak elemen hingga. Pendekatan analisis yang paling umum digunakan dan ditetapkan sebagai pilihan desain yang valid pada struktur baja [7] adalah dengan penggunaan teknik analisa elemen hingga benda padat, dengan analisa non-linear [10].

Secara umum, proses permodelan ini memiliki beberapa tahapan yaitu:

1. Pembuatan geometri 3D
2. Definisi material
3. Penetapan meshing
4. Penerapan pembebanan
5. Definisi kontak antar elemen
6. Pengolahan data dan analisa hasil

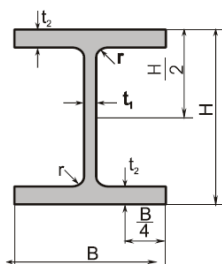
Pembuatan geometri 3D akan dibantu dengan software lain berupa Autodesk AutoCAD untuk sketsa awal dan Autodesk Inventor untuk pembuatan geometri secara parsial. Definisi material akan disesuaikan dengan spesifikasi baja yang akan dipakai, yaitu berupa baja mutu normal A36 sesuai standar ASTM. *Meshing* adalah pembagian elemen menjadi beberapa elemen yang cukup kecil sehingga hasil dari perhitungan dapat mendekati fenomena sebenarnya. Terdapat berbagai macam bentuk *meshing* dimana harus dipilih sesuai dengan bentuk elemen utuhnya. Pada penelitian ini digunakan *meshing* bentuk segi empat.

Pembebanan ditetapkan besaran tertentu sehingga fenomena *shear lag* dapat diamati secara maksimal. Elemen-elemen yang saling bersentuhan harus dirumuskan sifat dari sambungannya apakah terikat sempurna (*bonded*), *frictional*, dan lain sebagainya. Terakhir adalah mengamati hasil dari

simulasi berupa tegangan maksimal, sehingga dapat dibandingkan dengan ketetapan standar.

Untuk memastikan aplikasi yang digunakan dan memastikan metode serta penggunaan aplikasi yang sudah benar, dilakukan uji validitas dan reliabilitas instrumen dengan menghitung tegangan yang terjadi pada badan batang (bagian batang baja yang sudah cukup jauh dari sambungannya) dimana tegangan sudah terbentuk secara merata ke semua area penampang. Apabila hasil perhitungan manual dan hasil dari permodelan sudah cukup dekat maka disimpulkan bahwa instrumen sudah berjalan dengan baik.

Penelitian ini menggunakan tiga buah jenis ukuran profil WF dengan mutu baja A36, sebagai salah satu mutu baja yang paling banyak dipakai pada struktur baja [8]. Detail dari ketiga profil tersebut seperti terlihat pada **Tabel 1**.



Tabel 1. Detail ukuran dimensi profil

	H	B	t ₁	t ₂	r	A _g
	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²
WF300 x150	300	150	6,5	9	13	46,78
WF400 x200	400	200	8	13	16	84,1
WF600 x300	600	300	12	20	28	192,5

Metode sambungan yang digunakan adalah dengan menggunakan pelat buhul di kedua sisi badan baja kemudian dianggap melekat sempurna dengan badan WF (*bonded*). Hal ini digunakan agar permodelan dapat berfokus pada fenomena *shear lag* saja, apabila sambungan dengan menggunakan baut maka akan ada pengurangan luas penampang bersih (A_n).

Mutu baja yang digunakan pada pelat buhul sama dengan mutu baja pada baja WF, yaitu A36. Ketinggian pelat buhul diambil sebesar 75% dari ketinggian baja WF serta ketebalannya diambil angka tertentu sehingga total luas penampang pelat buhul lebih besar dari baja WF. Dengan luas penampang pelat buhul yang lebih besar dari baja WF, kuat tarik pelat buhul dapat dipastikan akan

melampaui kuat tarik baja WF. Detail dari ukuran pelat buhul yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. Ukuran tinggi dan tebal pelat buhul

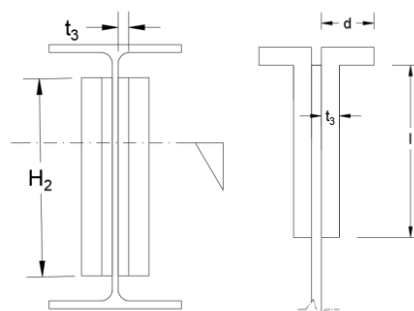
Profil Baja WF	H ₂	t ₃
	(mm)	(mm)
WF300x150	225	12
WF400x200	300	16
WF600x300	450	24

$$A_e = A_n U \quad (1)$$

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad (2)$$

Persamaan 1 dan **Persamaan 2** merupakan formula dalam mencari nilai luas efektif (A_e) dari [7], [11] untuk sambungan profil WF, kanal, dan siku. Dimana A_n adalah luas penampang bersih profil, U adalah faktor reduksi, nilai \bar{x} sebagai jarak pusat massa setengah badan dari titik massa umum, serta l adalah panjang sambungan longitudinal.

Persamaan 2 digunakan untuk menghitung kebutuhan panjang sambungan pelat buhul dimana diatur agar pada profil yang terkecil memiliki nilai U = 0,8.



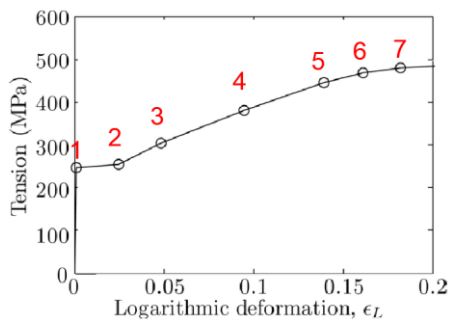
Gambar 2. Detail dimensi pelat buhul

Tabel 3. Detail ukuran dimensi pelat buhul

Profil Baja	Dimensi pelat buhul			
	H ₂	t ₃	l	d
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
WF300x150	225	12	115	36
WF400x200	300	16	115	48
WF600x300	450	24	115	72

Keseluruhan material baja diasumsikan memiliki grafik tegangan dan regangan multilinear sehingga akan didefinisikan baik pada elemen elastis maupun pada plastisnya. Dengan grafik multilinear tentunya hasil percobaan akan lebih mendekati hasil real bila dibandingkan dengan linear (hanya elastis) atau hanya bilinear. Grafik hubungan tegangan dan regangan yang dipakai berasal dari penelitian [12]

yang disadur dari penelitian [13] seperti pada **Gambar 3**. Dari grafik tersebut dipetakan nilai regangan dan tegangannya adalah pada **Tabel 4**.



Gambar 3 Tegangan dan Regangan Baja A36

Tabel 4. Tegangan dan Regangan Engineering [13]

No	Nilai Engineering	
	Regangan	Tegangan (MPa)
1	0.00125	250.00
2	0.02457	256.27
3	0.04817	305.22
4	0.09461	382.03
5	0.13923	446.97
6	0.16106	469.58
7	0.18193	480.00

Nilai dari hasil eksperimen tersebut tidak dapat digunakan secara langsung ke dalam permodelan Ansys karena pada aplikasi tersebut memisahkan antara elemen elastis dengan elemen plastisnya. Sebagai tambahan, studi hasil eksperimen juga menganggap luas permukaan benda uji konstan, sedangkan pada kondisi sebenarnya terdapat pengecilan penampang pada proses uji tarik (*poisson ratio*). Atas dasar alasan tersebut dilakukan perhitungan lanjutan sebelum dimasukkan ke dalam Ansys.

Dengan **Persamaan 3** dapat dihasilkan nilai tegangan sebenarnya (σ_{true}) dari hasil uji pada saat baja pada titik leleh. Dilanjutkan menghitung nilai regangan elastis pada saat leleh (**Persamaan 4**), kemudian setiap nilai regangan pada uji coba tes dikurangkan dengan nilai regangan elastis tersebut untuk mendapatkan regangan pada elemen plastis saja (**Persamaan 5**). Hasil akhir nilai regangan sebagai *input* definisi material terdapat pada **tabel 5**.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng.} \times (1 + \epsilon_{eng.}) \quad (3)$$

$$\epsilon_{elastic} = \frac{\sigma_{true}}{E} \dots \quad (4)$$

$$\epsilon_{plastis} = \epsilon_{total} - \epsilon_{elastic} \quad (5)$$

Tabel 5. Regangan Plastis

No	Tegangan (MPa)	Regangan	
		Total (ϵ_{total})	Plastis ($\epsilon_{total} - \epsilon_{elastic}$)
1	250.00	0.00125	0
2	256.27	0.02457	0.02331
3	305.22	0.04817	0.04691
4	382.03	0.09461	0.09336
5	446.97	0.13923	0.13798
6	469.58	0.16106	0.15981
7	480.00	0.18193	0.18067

Ukuran *mesh* di dalam perhitungan elemen hingga berpengaruh ke dalam hasil perhitungan. Semakin kecil ukuran *mesh* maka akan menghasilkan nilai yang lebih mendekati sebenarnya. Di sisi lain, *mesh* yang semakin kecil dan banyak akan meningkatkan waktu proses pengolahan data. Pada penelitian ditetapkan ukuran *mesh* adalah 20 mm, dimana pada ukuran ini sudah cukup akurat dalam menghasilkan nilai tegangan. Sebagai perbandingan, hasil tegangan maksimal yang ditopang oleh WF600x300 dengan *mesh* 10 mm dengan 20 mm dilakukan uji coba. Pada keduanya hanya terdapat perbedaan hasil 1% tetapi memiliki perbedaan durasi penyelesaian pengolahan data hingga sekitar empat kalinya.

Untuk memastikan instrument penelitian sudah diatur dengan baik, telah dilakukan percobaan sederhana dimana dapat diketahui jika nilai yang dihasilkan benar atau salah. Percobaan sederhana dilakukan dengan menggunakan WF400x200 tanpa sambungan, kemudian dilakukan tegangan tarik secara perlahan dan diamati gaya maksimal yang dapat diampu oleh baja tersebut.

Seperti yang sudah dijelaskan bahwa baja menggunakan mutu A36 dengan tegangan puncak yang dapat ditahan adalah 480 MPa. Tegangan tarik diberikan perlahan sebesar 600 MPa. Dari hasil uji kredibilitas, simulasi baja mengalami putus di rasio tegangan 0,79974 atau pada 479,8 MPa sehingga dapat disimpulkan bahwa instrumen cukup kredibel.

3. HASIL PEMBAHASAN

Pada penelitian ini hanya berfokus pada daerah sambungan, dimana sesuai ketetapan pada [7] bahwa tegangan plastis diperbolehkan terjadi pada area sambungan karena besarnya panjang sambungan umumnya tidak besar sehingga penambahan panjang batang tidak signifikan. Atas dasar tersebut indikator kegagalan struktur adalah hingga struktur telah mencapai tegangan puncak ($F_u = 480$ MPa) dan sudah tidak dapat menahan tegangan tambahan lagi.

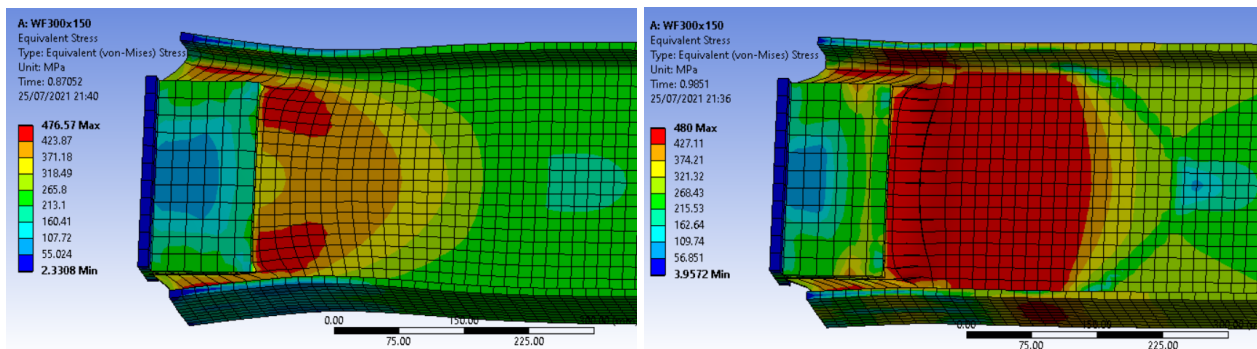
Setelah semua sudah didefinisikan dengan baik, terakhir adalah proses menjalankan simulasi. Gaya

tarik aksial diberikan kepada baja WF berupa tegangan dengan nilai tertentu sehingga pada bagian sambungan sudah terjadi kegagalan. Apabila tegangan tarik sudah melewati batas kekuatan maksimalnya, dapat terlihat pula nilai tegangan maksimal yang dapat ditopang oleh struktur tersebut hingga putus. Hasil dari tes tegangan tarik maksimal pada simulasi untuk ketiga profil terdapat pada **Tabel 6** dengan visual distribusi tegangan pada **Gambar 4**,

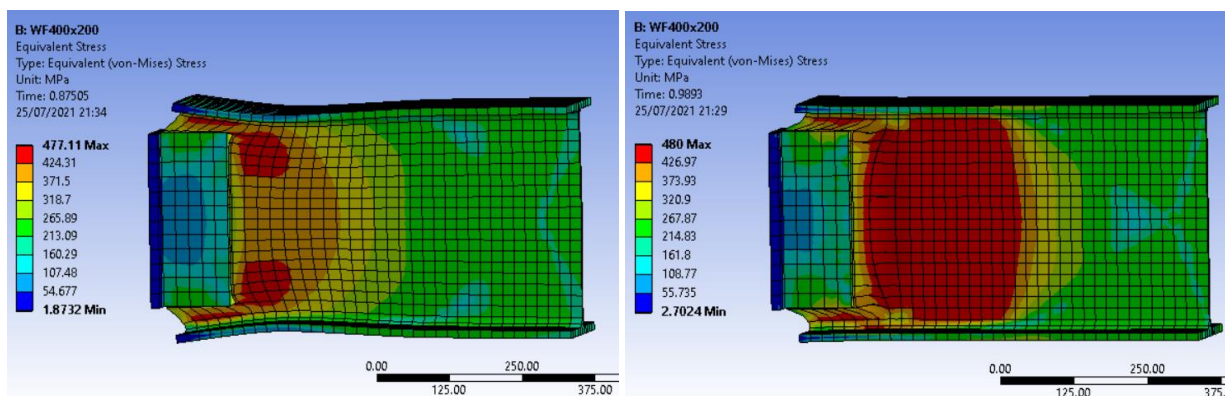
Gambar 5 dan **Gambar 6**.

Tabel 6. Tegangan tarik maksimum baja

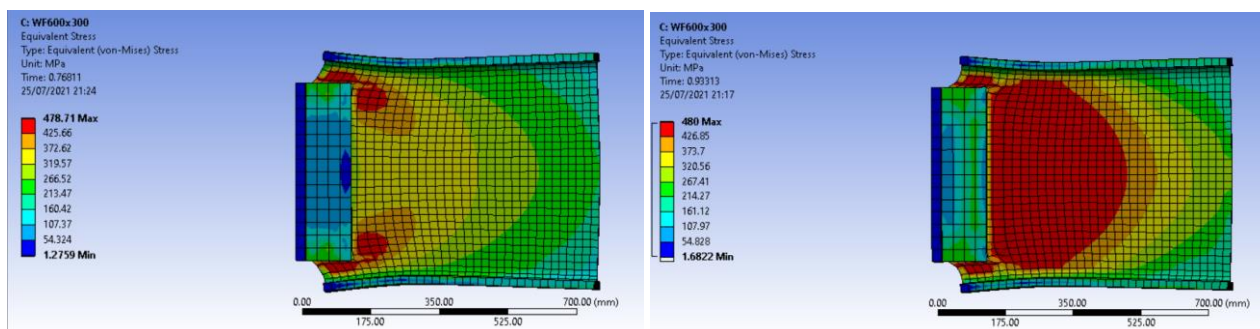
Profil Baja	Tegangan Putus (MPa)
WF300x150	276
WF400x200	234
WF600x300	198



Gambar 4. WF300x150 dengan tegangan tarik 244 MPa (atas) dan 276 MPa (bawah)



Gambar 5. WF 400x200 dengan tegangan tarik 207 MPa (atas) dan 234 MPa (bawah)



Gambar 6. WF600x300 dengan tegangan tarik 161 MPa (atas) dan 210 MPa (bawah)

Dari hasil simulasi di atas diambil nilai U hasil eksperimen (U_{eks}) dengan membandingkan kuat tarik puncak baja yang sebenarnya dengan menggunakan **Persamaan 6** dan **Persamaan 1**. Kemudian nilai U

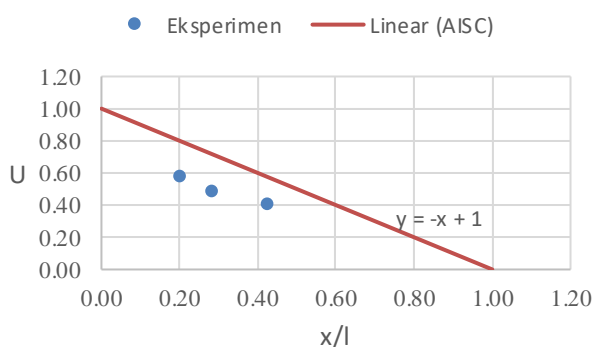
hasil dari simulasi dibandingkan dengan nilai U hasil dari perhitungan pada standar SNI 1729:2020 (U_{SNI}), dimana pada perhitungan tersebut didapat nilai adalah 0,80; 0,72; 0,57 berturut-turut untuk profil

baja WF300x150, WF400x200 dan WF600x300 seperti pada Tabel 7.

$$P_n = F_u A_e \quad (6)$$

Tabel 7. Rangkuman data eksperimen dan literatur

Ukuran Baja	F _u (MPa)	Data Sampel			U _{SNI}	Teg. Putus (MPa)	U _{eks.}
		Panjang sambungan (l) – mm	\bar{x} (mm)	\bar{x}/l			
WF300x150	480	115	23.0	0.20	0.80	276	0.58
WF400x200	480	115	32.5	0.28	0.72	234	0.49
WF600x300	480	115	49.2	0.43	0.57	198	0.41



Gambar 7. Pemetaan hasil eksperimen dibandingkan dengan AISC

Terdapat perbedaan yang cukup jauh antara hasil literatur dengan hasil eksperimen, dimana rata-rata nilai U hasil eksperimen hanya 71% dari hasil literatur sehingga kekuatan tarik yang dimiliki juga demikian. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 8 dan Gambar 7. Hal ini tentu menjadi masalah apabila dalam proses desain terjadi perkiraan kekuatan struktur yang lebih tinggi dari sebenarnya. Walaupun cukup jauh, tetapi keduanya memiliki pola hasil yang sama yaitu nilai U menurun ketika nilai \bar{x}/l meningkat.

Tabel 8. Perbandingan hasil eksperimen dengan literatur

Ukuran Baja	U _{SNI}	U _{eks.}	$\frac{U_{eks}}{U_{AISC}}$
WF300x150	0.80	0.58	0.72
WF400x200	0.72	0.49	0.68
WF600x300	0.57	0.41	0.72
Rata-rata			0,71

Sebagai tambahan, proses distribusi tegangan dari ketiga sampel menunjukkan alur yang sama. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6, tegangan terbesar dari sambungan baja ini terjadi pertama kali pada daerah atas dan bawah pelat buhul atau pada sambungan longitudinal

baja WF, kemudian menjalar ke sisi tengah menuju ke sambungan transversal baja WF dan terakhir adalah seluruh bagian web dari baja WF sudah mencapai titik F_u sehingga sudah tidak mampu menahan beban lagi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari ketiga sampel benda uji dengan WF600x300, WF400x200, dan WF300x150 dengan nilai panjang sambungan yang sama (l = 115 mm) didapat hasil nilai faktor reduksi (U) berturut-turut adalah 0,41; 0,49; 0,58.

Hasil perhitungan faktor reduksi dengan menggunakan standar ketetapan desain SNI 1729:2020 adalah 0,57; 0,72; 0,80. Terdapat perbedaan yang cukup jauh antara hasil literatur dengan hasil eksperimen, dimana rata-rata nilai U hasil eksperimen hanya 71% dari hasil literatur sehingga kekuatan tarik yang dimiliki juga demikian. Hal ini tentu menjadi masalah apabila dalam proses desain terjadi perkiraan kekuatan struktur yang lebih tinggi dari sebenarnya. Walaupun cukup jauh, tetapi keduanya memiliki pola hasil yang sama yaitu nilai U menurun pada saat nilai \bar{x}/l meningkat.

Saran

Terdapat perbedaan kekuatan tarik hasil eksperimen dengan ketetapan AISC 360-22. Hal ini tentu menjadi masalah apabila dalam proses desain terjadi perkiraan kekuatan struktur yang lebih tinggi dari sebenarnya sehingga perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut dengan menggunakan berbagai variabel yang berbeda.

Terima kasih diucapkan kepada Universitas Mercu Buana atas dukungan pendanaan sehingga riset ini bisa selesai dengan baik.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] MUNSE WH. 1970. *Final report on riveted and bolted structural joints*. Ill Univ, Civ Eng Stud, Struct Res Ser 365, no. 365, 1970.

- [2] J. Kent Hsiao dan S. Shrestha. 2018. *Shear lag factors for tension angles with unequal-length longitudinal welds*. Advanced Steel Construction, vol. 14, no. 4, pp. 589–605, Dec. 2018, doi: 10.18057/IJASC.2018.14.4.
- [3] K. Ke, Y. H. Xiong, M. C. H. Yam, A. C. C. Lam, dan K. F. Chung. 2018. *Shear lag effect on ultimate tensile capacity of high strength steel angles*. J Constr Steel Res, vol. 145, pp. 300–314, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.02.015.
- [4] M. Abedin, S. Maleki, N. Kiani, dan E. Shahrokhinasab. 2019. *Shear lag effects in angles welded at both legs*. Advances in Civil Engineering, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/8041767.
- [5] J. F. Borges, V. F. de Paula, F. Evangelista, dan L. M. Bezerra. 2021. *Reliability and uncertainty quantification of the net section tension capacity of cold-formed steel angles with bolted connections considering shear lag*. Advances in Structural Engineering, vol. 24, no. 7, pp. 1283–1296, May 2021, doi: 10.1177/1369433220971731.
- [6] M. A. Alhassan, K. M. Abdalla, dan M. E. AL-Shatnawi. 2020. *Critical Evaluation of the Shear Lag Factor Provisions for W-Sections*. Front Built Environ, vol. 6, Sep. 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00144.
- [7] *Specification for Structural Steel Buildings Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings*. 2022.
- [8] W. T. Segui. 2018. *Steel Design* 6th ed. Boston: Cengage Learning, 2018.
- [9] I. Fleitas, J. Bonilla, L. M. Bezerra, dan E. Mirambell. 2020. *Net section resistance in bolted cold-formed steel angles under tension*. J Constr Steel Res, vol. 167, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105841.
- [10] M. Abambres dan M. R. Arruda. 2016. *Finite element analysis of steel structures - A review of useful guidelines*. International Journal of Structural Integrity, vol. 7, no. 4, pp. 490–515, Aug. 2016, doi: 10.1108/IJSI-07-2015-0020.
- [11] *Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. 2020.
- [12] ASM International. 2002. *Atlas of stress-strain curves*. ASM International.
- [13] F. J. Luperi dan F. Pinto. 2016. *Structural Behavior of Barges in High-Energy Collisions against Bridge Piers*. Journal of Bridge Engineering, vol. 21, no. 2, Feb. 2016, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000789.