

# JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang

## Kajian Eksperimental Evaluasi Kinerja Kuat Lentur Sambungan *Ordinary* dan *Extended End Plate*

**Arief Panjaitan**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
E-mail: arief\_panjaitan@usk.ac.id

**Purwandy Hasibuan**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
E-mail: purwandy.hsb@usk.ac.id

**Mochammad Afifuddin**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
E-mail: m.afifuddin@usk.ac.id

**Surya Bermansyah**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
E-mail: surya\_cesp@usk.ac.id

**Muhammad Haiqal**

Departemen Arsitektur dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
E-mail: m.haiqal@usk.ac.id

### Abstrak

*Sambungan pelat ujung (end plate connection) adalah sambungan semi kaku yang secara umum digunakan untuk menghubungkan balok-kolom. Salah satu alternatif untuk meningkatkan kapasitas lentur sambungan adalah memperluas area sambungan pelat ujung. Namun, upaya yang dilakukan tersebut butuh dievaluasi lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi kuat lentur sambungan pelat ujung dengan memberikan beberapa perkuatan yaitu penambahan area sambungan, pemasangan pengaku pelat badan, dan perpanjangan penyokong di area bawah balok. Untuk mengevaluasi signifikansi perkuatan, benda uji tanpa perkuatan (ordinary end plate connection) digunakan sebagai acuan. Penelitian dilakukan melalui pemberian beban geser yang ditempatkan pada 400 mm dari sambungan dan beban ditingkatkan secara bertahap hingga benda uji gagal. Kajian eksperimental menunjukkan benda uji dengan kombinasi perkuatan berupa penambahan area sambungan dan penambahan pengaku badan memberikan kuat geser dan lentur yang paling baik. Kajian teoritis mengacu ke SNI 03-1729-2020 menunjukkan kuat lentur nominal lebih kecil dibandingkan kuat lentur eksperimental. Hal ini menunjukkan kajian teoritis memberikan kuat lentur lebih konservatif.*

**Kata-kata Kunci:** *Sambungan pelat ujung, sambungan ordinary end plate, sambungan extended end plate, kuat lentur, kuat geser, deformasi*

### Abstract

*An end plate connection is a semi-rigid connection used to connect a beam to a column. One alternative to improve the flexural strength is to enlarge the end plate connection area. However, this strengthening approach needs to be more specifically investigated. This study aims to evaluate the flexural strength of the connections by several strengthening methods: enlarging the connection area, installing web stiffeners, and lengthening the haunch at the bottom side of the beam. To examine the significance of strengthening approaches, an un-strengthened specimen (ordinary end plate connection) was considered as the reference. The research work was first carried out by positioning the shear load at a distance of 400 mm from the connection area, and it was gradually increased until the specimens failed. The experimental study also revealed that the specimen strengthened by combining an enlarged connection area and web stiffeners performed the best in terms of shear and flexural strength. The theoretical study referring to the SNI 03-1729-2020 demonstrated the nominal flexural strength, which is smaller than the experimental flexural strength. This behavior showed that the theoretical study provided more conservative flexural strength.*

**Keywords:** *End plate connection, ordinary end plate connection, extended end plate connection, flexural strength, shear strength, deformation*

\* Penulis Korespondensi: arief\_panjaitan@usk.ac.id

## 1. Pendahuluan

Sambungan pelat ujung adalah tipe sambungan semi kaku dimana alat sambung las digunakan untuk menghubungkan balok-pelat ujung dan alat sambung baut digunakan untuk menghubungkan pelat ujung dengan kolom. Dalam perencanaan, sambungan pelat ujung didesain untuk memiliki ketahanan terhadap gaya geser dan momen.

Beberapa kajian terdahulu telah dilakukan untuk meningkatkan kuat lentur sambungan pelat ujung dengan melakukan perkuatan pada sambungan. Shaheen dkk (2020) melakukan kajian elemen hingga pada sambungan pelat ujung dengan pemanfaatan *sleeve* baja pada baut untuk meningkatkan daktilitas sambungan. *Sleeve* baja adalah sebuah modifikasi cangkang baja yang diperuntukkan untuk menahan beban lentur dimana tegangan lentur akan meningkat ketika rasio ketebalan cangkang terhadap kelengkungan *sleeve* bertambah (Zingoni, 2017). Ekhlasi dkk (2018) melakukan studi perilaku sambungan pelat ujung dan menunjukkan pemanfaatan pelat tambahan pada pelat badan kolom adalah hal yang esensial dan dapat mencegah tekuk lokal pada zona panel di kolom. Sathian dan Geetha (2020) meneliti pengaruh pemasangan pengaku (*stiffener*) pada sisi atas dan bawah balok pada area sambungan *extended end plate* terhadap kinerja sambungan. Kajian menunjukkan terdapat peningkatan kuat lentur dan geser seiring dengan penambahan pengaku pada balok di area sambungan. Shi dkk (2010) meneliti pengaruh pengaku kolom, pengaku *rib* pada pelat ujung, diameter baut, dan ketebalan pelat ujung terhadap perilaku sambungan. Nuñez dkk (2020) melakukan kajian numerik terhadap kinerja seismik sambungan momen pelat ujung antara balok IWF dan kolom HSS (*Hollow Structural Section*) yang diperkaku oleh diafragma luar (EP-HSS).

Pada studi terdahulu, terdapat beberapa kajian yang mengobservasi pengaruh jenis pembebanan terhadap perilaku sambungan pelat ujung. Karasu dkk (2018) menginvestigasi perilaku sambungan pelat ujung terhadap beban monotonik dimana sambungan divariasikan terhadap material, geometri, dan nonlinearitas dari kontak di pemodelan. Baei dkk (2012) menganalisis secara numerik kinerja seismik sambungan momen pada pelat ujung dengan mengikutsertakan pengaruh gaya aksial pada sambungan. Luo dkk (2020a) mengkaji perilaku kuat lentur sambungan pelat ujung untuk kondisi *weak column and strong beam* dengan pemberian perpindahan lateral pada struktur kolom. Luo dkk (2020b) menganalisis perilaku sambungan *extended end plate* terhadap beban siklik yang ditempatkan pada sisi atas kolom dengan evaluasi pada kuat lentur, kekakuan rotasi dan batasan rotasi

sambungan. Lin dkk (2022) melakukan kajian perilaku seismik sambungan *extended end plate* yang tersusun atas baja mutu tinggi terhadap beban siklik dimana dari kajian dilakukan pengamatan kuat lentur, deformasi, dan celah (*gap*) yang terbentuk antara baut dengan mur dan pelat ujung dengan sayap kolom. Satish dan Chougule (2020) meneliti perilaku dari beberapa sambungan *extended end plate* terhadap beban siklik sebagai evaluasi terhadap beban gempa melalui kajian numerik dimana parameter yang diamati adalah deformasi, *maximum principal stress*, *maximum principal strain* and kurva histerisis. Moestopo dan Panjaitan (2012) mengkaji perilaku seismik link geser SRBK terhadap beban siklik dengan perletakan link berupa sambungan pelat ujung. Perkuatan sambungan pelat ujung pada elemen link dilakukan dengan penggunaan *wing plate* dan link hibrid, menunjukkan link hibrid memberikan kinerja seismik paling baik melalui histerisis beban-perpindahan yang lebih besar dan stabil.

Beberapa studi sebelumnya juga dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi konfigurasi dan komponen sambungan terhadap kuat lentur sambungan pelat ujung. Gao dkk (2020) meneliti perilaku struktur sambungan balok kolom dengan tipe sambungan *double extended end-plate* dimana sambungan pelat ujung ditempatkan di sisi kiri dan kanan kolom dan menunjukkan terdapat perbedaan dalam nilai rotasi sambungan namun tidak terdapat perbedaan kuat lentur *double extended end-plate* dan *single extended end-plate connection*. Ismail dkk (2016) melakukan kajian numerik elemen hingga pada sambungan pelat ujung untuk memperoleh perilaku lentur ultimit dengan beberapa variasi diameter baut, ketebalan pelat ujung, panjang pengaku kolom, dan dimensi pengaku pada sayap balok di area sambungan. Panjaitan dkk (2023) menganalisis kuat lentur dan kuat geser sambungan pelat ujung dengan penambahan jumlah baut dan perluasan area sambungan dan menunjukkan bahwa perluasan area sambungan yang dilakukan dapat mengurangi tegangan tarik akibat lentur hingga 97.6 persen dan mengurangi tegangan geser hingga 50 persen jika dibandingkan terhadap tegangan tarik dan tegangan geser yang terbesar. Abidelah dkk (2012) menganalisa kurva momen-rotasi dan gaya tarik baut beberapa jenis sambungan tipe *extended end plate* yang divariasikan menurut tata letak baut.

Pada praktiknya, perencana tidak menginginkan pengurangan ruang (*space*) di bagian bawah balok akibat penggunaan balok tinggi maupun penggunaan penyokong (*haunch*) di sisi bawah untuk meningkatkan kapasitas sambungan dalam memikul momen ujung. Penelitian ini berupaya untuk mengevaluasi kuat lentur sambungan pelat ujung melalui pemberian perkuatan tanpa meninggikan balok

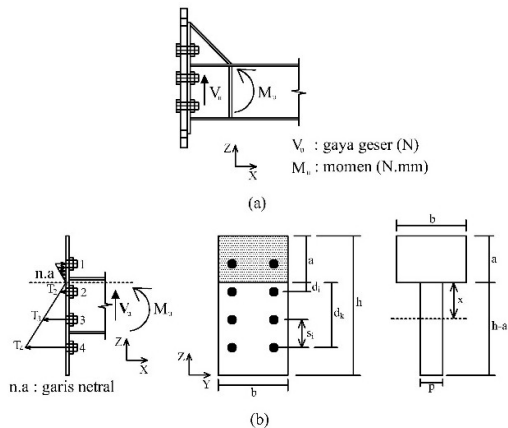
maupun menambah sokongan yang berlebihan dalam arah vertikal. Hal ini dimungkinkan dapat menambah ruang (*space*) di bawah balok dalam penerapan di kondisi yang sesungguhnya. Penelitian ini merupakan kajian eksperimental. Pada tahap awal, beberapa sambungan pelat ujung dengan jenis perkuatan yang berbeda dipersiapkan dan diuji. Sebagai tolak ukur, sambungan *ordinary end plate* (tanpa perkuatan) juga dites di laboratorium. Untuk selanjutnya, kajian teoritis yang mengacu ke SNI 03-1729-2020 dilakukan untuk memverifikasi hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium.

## 2. Program Penelitian

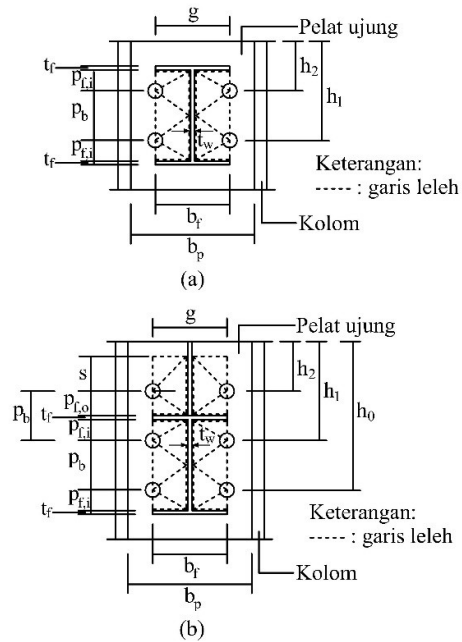
Kajian teoritis sambungan pelat ujung mengacu kepada SNI 03-1729-2020. Standar ini menyatakan bahwa baut akan mengalami kombinasi momen dan gaya geser pada sambungan, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1(a)**. Pada **Gambar 1(b)**, sehubungan adanya momen, baut-baut pada sambungan akan memberikan kontribusi gaya tarik dan tekan dalam menahan momen. Baut-baut yang berada pada baris 2, 3 dan 4 memberikan kontribusi tarik sebesar  $T_2$ ,  $T_3$  dan  $T_4$ . Baut-baut yang berada pada baris 1 pada daerah penyokong (*haunch*) tidak memberikan kontribusi gaya tarik maupun tekan. **Gambar 1(b)** juga menunjukkan metode transformasi area (*transformed area method*) dalam mewakili kumpulan baut yang menahan gaya tarik dan pelat ujung yang menahan tekan. Pada metode transformasi area, baut dalam arah tarik dapat digantikan oleh area persegi panjang dengan lebar ( $p$ ) dan panjang ( $h-a$ ) sebagaimana diilustrasikan pada **Gambar 1(b)**. Rumus dalam pendefinisian parameter sambungan pelat ujung adalah untuk kondisi elastis dan mengacu ke SNI 03-1729-2020.

$$p = \frac{m.A_b}{s} \quad (1)$$

Statis momen terhadap garis netral memberikan:



**Gambar 1. Gaya dalam pada sambungan pelat ujung: (a) Sambungan pelat ujung yang memikul gaya geser dan momen; (b) Transformed area method**



**Gambar 2. Geometri pelat ujung dalam memperhitungkan kuat lentur teoritis menurut rotasi pelat ujung: (a) Ordinary end-plate connection, (b) Extended end-plate connection**

$$\frac{1}{2} a^2 b = \frac{1}{2} p (h - a)^2 \quad (2)$$

Momen inersia penampang transformasi diberikan sebagai:

$$I = \frac{a^3 b}{3} + \sum_{i=1}^n A_i d_i^2 \quad (3)$$

Gaya tarik yang ditahan satu baris baut terbawah adalah:

$$T_k = \frac{M_u \cdot m \cdot A_b \cdot d_k}{I} \quad (4)$$

Tegangan tarik pada sebuah jarak tertentu diukur dari garis netral didefinisikan sebagai:

$$(f_t)_x = \frac{T_i}{m A_b} \quad (5)$$

Tegangan geser pada setiap baut dinyatakan dengan:

$$f_{uv} = \frac{V_u}{mn} \quad (6)$$

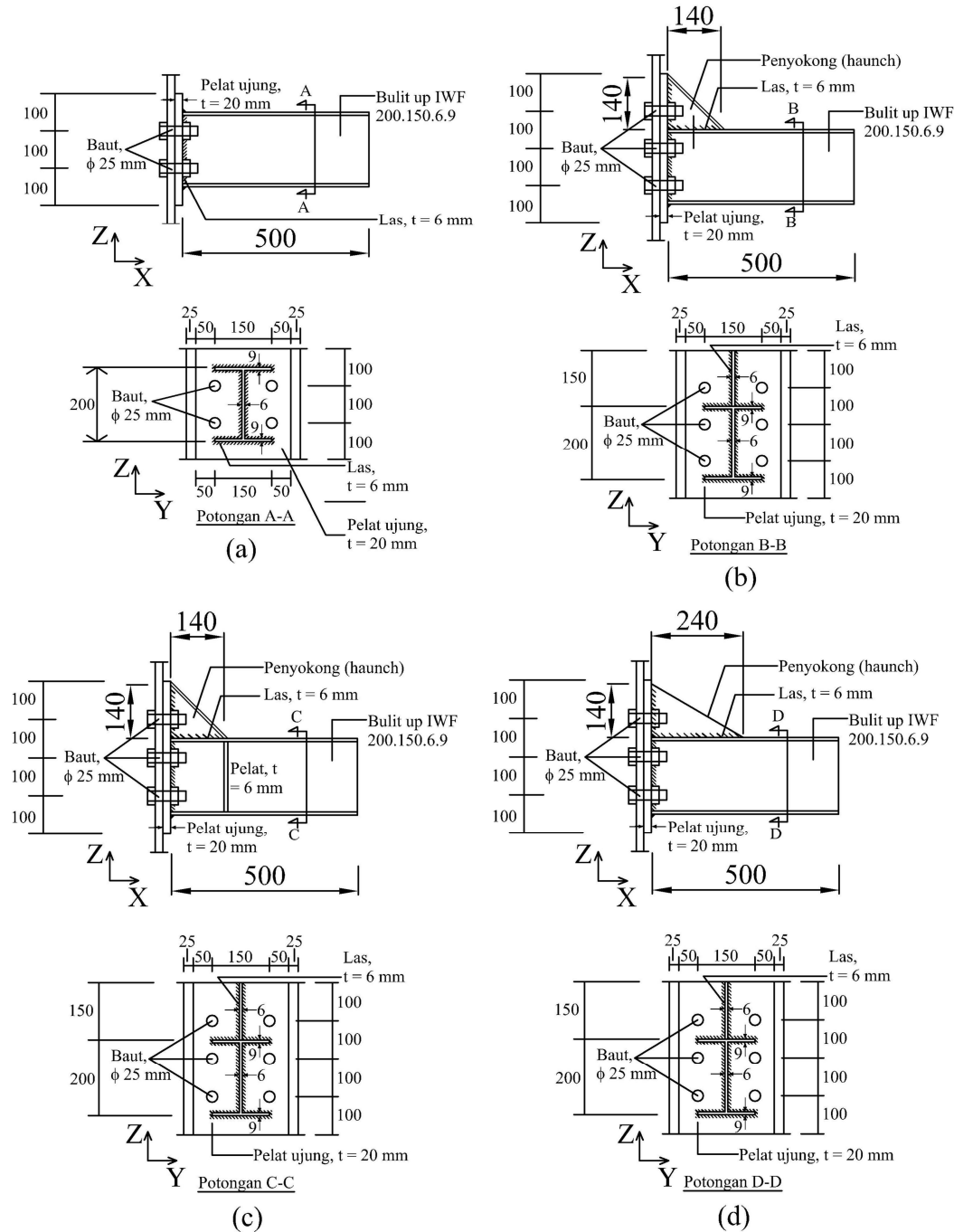
Kapasitas geser baut A490 diverifikasi sebagai:

$$\phi(1100 - 1.9 f_{uv}) \leq \phi(779) \quad (7)$$

Kapasitas tarik baut A490 diverifikasi sebagai:

$$(f_t)_x \leq \phi(F_u^b) \quad (8)$$

Dimana,  $a$  adalah ketinggian area tekan (mm),  $b$  adalah lebar area tegangan tekan (mm),  $s_i$  adalah jarak antar baut (mm),  $A_b$  adalah luas penampang satu baut ( $\text{mm}^2$ ),  $A_i$  adalah luas penampang satu baris baut ( $\text{mm}^2$ ),  $p$  adalah lebar area transformasi (mm),  $h$  adalah jarak dari sisi atas pelat ujung ke center

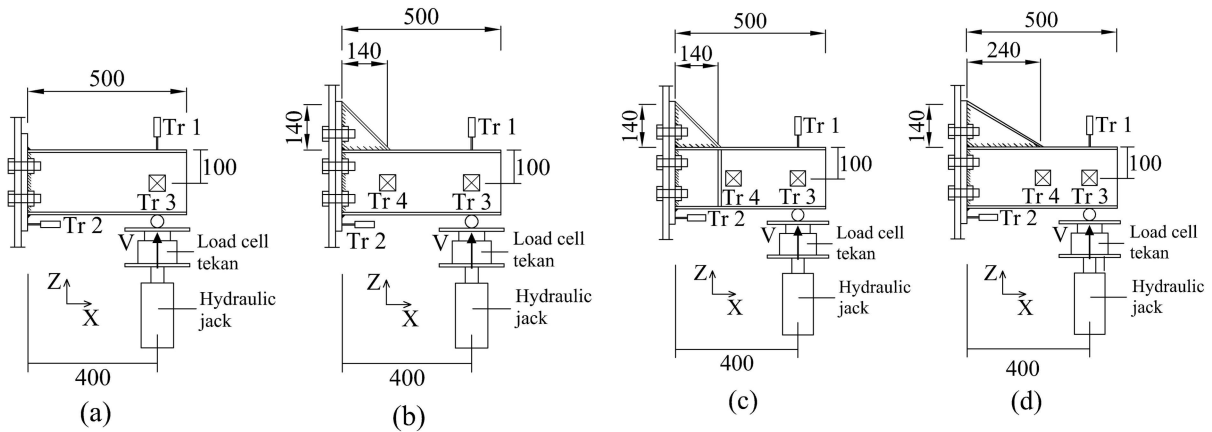


Gambar 3. Benda uji (unit: mm): (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Tabel 1. Hasil Uji Tarik

No	Komponen	Grade	Elemen	Tegangan leleh (MPa)	Tegangan tarik (MPa)	Modulus elastisitas (MPa)
1	Built up IWF	A572	Pelat sayap	343	458	213930
		A572	Pelat badan	338	440	205109
2	Pelat ujung	A572	Pelat	351	467	217757

Dimana,  $M_n$  adalah kuat lentur teoritis (N.mm),  $t_p$



Gambar 4. Penempatan *transducer* pada benda uji (unit: mm)

dari baut tarik terbawah (mm),  $T_k$  adalah gaya tarik yang satu baris baut terbawah (N),  $M_u$  adalah momen ujung ultimit (N.mm),  $d_i$  adalah jarak dari garis netral ke baut dalam area tarik (mm),  $I$  adalah momen inersia penampang transformasi (mm<sup>4</sup>),  $(f_t)_x$  adalah tegangan tarik (MPa),  $f_{uv}$  adalah tegangan geser ultimit (MPa),  $V_u$  adalah gaya geser ultimit (N),  $m$  adalah jumlah baut dalam satu baris,  $n$  adalah jumlah baut dalam satu kolom,  $F_u^b$  adalah tegangan ultimit baut (MPa).

**Gambar 2** memperlihatkan geometri pelat ujung yang digunakan untuk menghitung kuat lentur sambungan akibat terjadinya rotasi pelat. Pada gambar juga terlihat parameter geometri pelat yaitu  $h_0$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $p_{f,i}$ ,  $p_{f,o}$ ,  $p_b$ ,  $s$ ,  $b_p$ , dan  $g$ .

Kuat lentur sambungan pelat ujung mengacu ke ANSI/AISCE 360-10 dan *Design Guide of End-Plate Connections* (Murray dan Shoemaker, 2010):

$$M_n = \frac{t_p^2 \phi_b F_{py} Y_{i(i=1,2)}}{\gamma_1} \quad (9)$$

Pada sambungan *ordinary end plate*, parameter garis leleh ( $Y_1$ ) ditentukan dengan:

$$Y_1 = \frac{b_p}{2} \left[ \left( \frac{h_1}{p_{f,i}} \right) + \left( \frac{h_2}{p_{f,i}} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{f,i} - 0.75p_b) + h_2(p_{f,i} + 0.25p_b)] + \frac{g}{2} \quad (10)$$

Pada sambungan *extended end plate*, parameter garis leleh ( $Y_2$ ) ditentukan dengan

$$Y_2 = \frac{b_p}{2} \left[ \left( \frac{h_1}{p_{f,i}} \right) + \left( \frac{h_2}{s} \right) + h_0 \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{p_{f,i}} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_1(p_{f,i} + 0.75p_b) + h_3(s + 0.5p_b) + h_0(s + p_{f,i})] + \frac{g}{2} \quad (11)$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad (12)$$

adalah tebal pelat ujung (mm),  $\phi_b$  adalah faktor reduksi lentur,  $F_{py}$  adalah tegangan leleh pelat ujung (MPa),  $\gamma_1$  adalah sebuah faktor bernilai 1.25 dan 1.0 untuk masing-masing sambungan *ordinary* dan *extended end plate*,  $Y_{i(i=1,2)}$  adalah parameter garis leleh sambungan (mm),  $Y_1$  adalah parameter garis leleh sambungan *ordinary end plate* (mm),  $Y_2$  adalah parameter garis leleh sambungan *extended end plate* (mm),  $b_p$  adalah lebar pelat ujung (mm),  $g$  adalah jarak antar baut dalam arah horizontal (mm).

Rasio kelangsingan penampang balok untuk dapat diklasifikasikan sebagai penampang kompak mengacu ke SNI 03-1729-2020:

$$\frac{h}{t_w} < \frac{1680}{\sqrt{F_{yw}}} \quad (13)$$

$$\frac{b}{2t_f} < \frac{170}{\sqrt{F_{yf}}} \quad (14)$$

*Bearing strength* pelat badan balok sehubungan adanya beban tekan terpusat mengacu ke ANSI/AISCE 360-10. Untuk jarak ujung balok ke titik bekerjanya gaya lebih besar atau sama dengan  $d/2$ , *bearing strength* ( $P_w$ ) diperhitungkan sebagai:

$$P_w = 0.8t_w^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{l_b}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{E F_{yw} t_f}{t_w}} \quad (15)$$

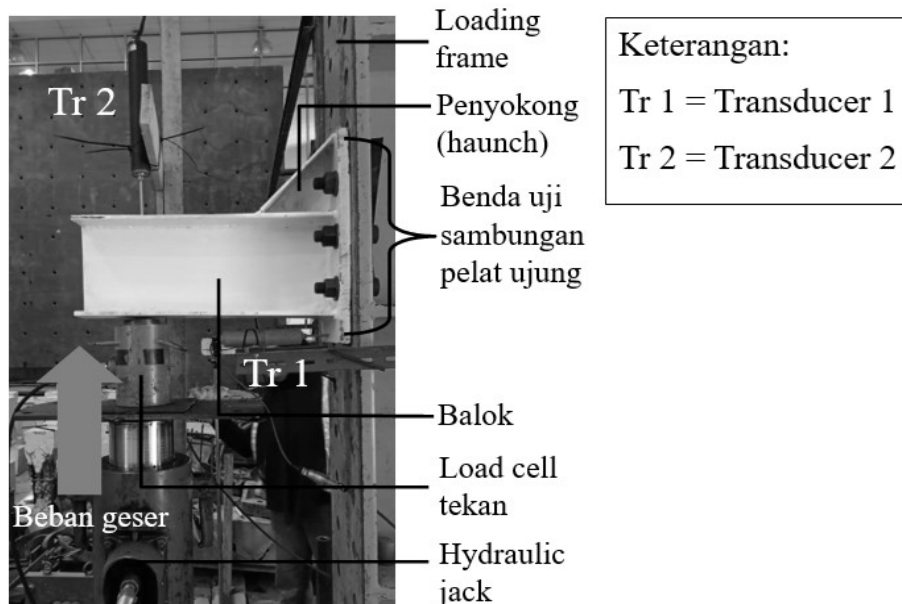
Dimana,  $t_w$  adalah pelat badan (mm),  $l_b$  adalah lebar kontak beban (mm),  $E$  adalah modulus elastisitas pelat badan (MPa),  $F_{yw}$  adalah tegangan leleh pelat badan (MPa),  $t_f$  adalah tebal pelat sayap (mm),  $d$  adalah tinggi balok (mm).

Pada studi ini, terdapat 4 (empat) benda uji yang terdiri atas satu sambungan *ordinary end plate* dan tiga sambungan *extended end plate*. Dalam upaya peningkatan kuat lentur, dua sambungan *extended end*

Tabel 2. Parameter deformasi benda uji

No	Transducer (I)	Posisi	Deformasi ultimit ( $d_u$ ) pada benda uji (j)			
			S1	S2	S3	S4
1	T1	Pelat sayap di bagian ujung balok	$d_{u1-1}$	$d_{u1-2}$	$d_{u1-3}$	$d_{u1-4}$
2	T2	Pelat ujung	$d_{u2-1}$	$d_{u2-2}$	$d_{u2-3}$	$d_{u2-4}$
3	T3	Pelat badan di bagian ujung balok	$d_{u3-1}$	$d_{u3-2}$	$d_{u3-3}$	$d_{u3-4}$
4	T4	Pelat badan di bagian berdekatan dengan perletakan	-	$d_{u4-2}$	$d_{u4-3}$	$d_{u4-4}$

Catatan:  $d_{ui-j}$  adalah bacaan deformasi ultimit transducer ke i (Tr i) pada benda uji ke j (Sj)



Gambar 5. Set up benda uji

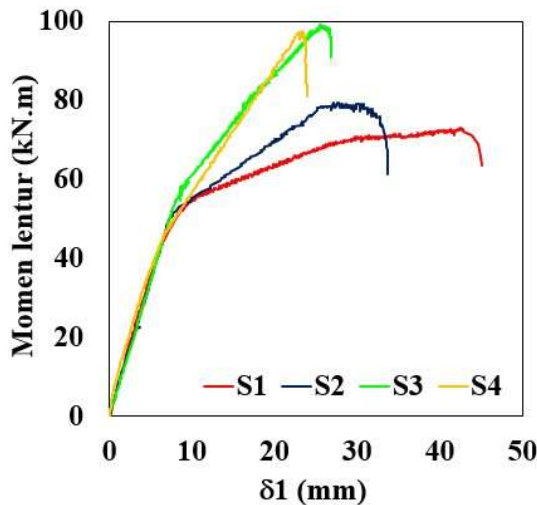
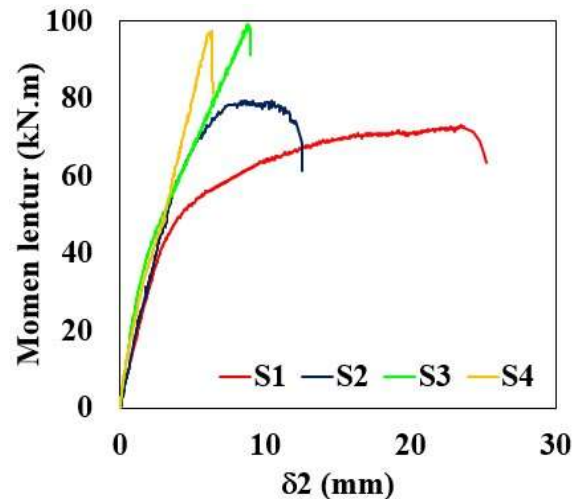
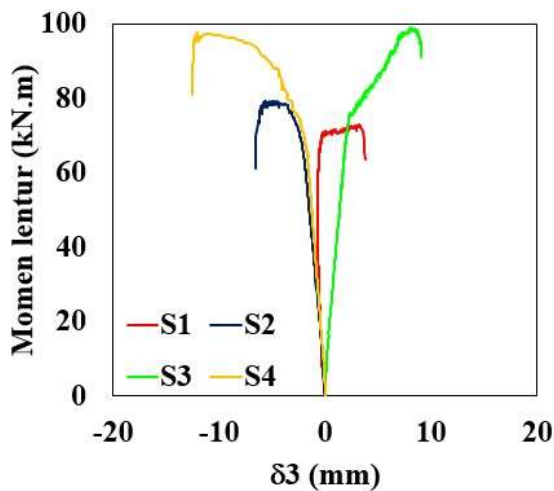
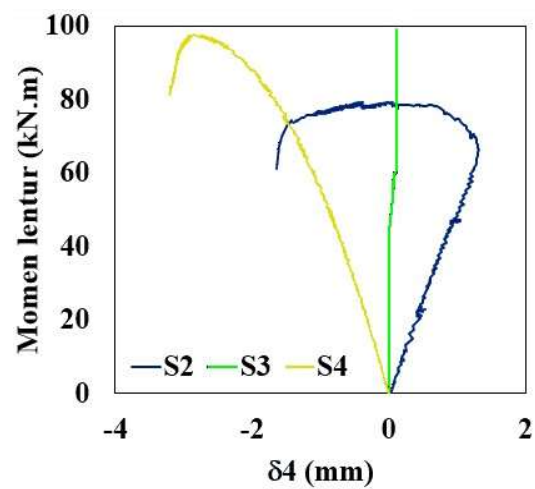
plate diperkuat dengan menambah pengaku badan untuk mencegah tekuk pelat badan dan perpanjangan penyokong untuk memperkuat area sayap balok.

Pada S1, S2, dan S3 panjang sokongan 140 mm dalam arah horiozontal diberikan untuk mengoptimalkan kinerja sokongan dalam memperkuat balok (panjang sokongan diambil sama dengan tinggi sokongan yaitu 140 mm dengan sudut miring penyokong sebesar 45°). Pada S4, panjang sokongan 240 mm dalam arah horizontal diberikan dalam upaya memperkuat sambungan dan memperluas ruang (*space*) di bawah balok jika nantinya sambungan digunakan pada struktur yang sesungguhnya. Untuk mengukur peningkatan kuat lentur, sambungan *ordinary end plate* dijadikan sebagai acuan kinerja dasar. Detail benda uji disajikan pada **Gambar 3**.

Pada kajian ini, pemilihan penampang IWF *built up* berukuran 200.150.6.9 sebagai balok didasarkan

untuk pemenuhan kebutuhan balok *gable* pada struktur gudang yang sudah pernah diteliti sebelumnya (Panjaitan dkk, 2023). Pada kajian terdahulu ini, sambungan pelat ujung diperuntukkan dalam menghubungkan balok-kolom. Penampang IWF *built up* adalah penampang yang tersusun atas pelat-pelat baja yang dirangkai dengan konfigurasi IWF. Hasil uji tarik dari balok IWF *built up* dan pelat ujung disajikan pada **Tabel 1**. Baut yang digunakan pada sambungan adalah baut mutu tinggi (A490) dengan kuat tarik ( $F_u^b$ ) sebesar 810 MPa.

**Gambar 4** mengilustrasikan posisi *transducer* di posisi pelat sayap balok, pelat badan balok, dan pelat ujung. Pada pelat badan, ujung *transducer* ditempatkan di setengah tinggi pelat badan untuk membaca nilai tekuk pelat badan paling besar yang umumnya terjadi pada setengah tinggi pelat badan balok akibat pembebanan tekan yang berasal dari pelat sayap. Pembacaan nilai deformasi ultimit disajikan

Gambar 6. Hubungan momen lentur -  $\delta_1$ Gambar 7. Hubungan momen lentur -  $\delta_2$ Gambar 8. Hubungan momen lentur -  $\delta_3$ Gambar 9. Hubungan momen lentur -  $\delta_4$ 

dalam penulisan pada **Tabel 2**. *Set up* pengujian diperlihatkan pada **Gambar 5**. Pada tahap awal, benda uji berupa sambungan pelat ujung dipasangkan pada *loading-frame*. Pengujian dilakukan dengan menempatkan beban geser balok dengan jarak sejauh 400 mm dari sambungan. Beban geser diberikan melalui *hydraulic jack* yang besaran pembebanannya ditingkatkan secara bertahap dengan kecepatan pembebanan 0,3 kN/detik. Selama pengujian, perekaman data dilakukan pada beban dan deformasi untuk memperoleh perilaku sambungan. Pada studi ini, observasi juga dilakukan untuk mengidentifikasi ragam kegagalan pada benda uji.

### 3. Hasil Pengujian dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Pengujian

Pengamatan yang dilakukan selama historis pembebanan menunjukkan terdapat perbedaan perilaku benda uji ketika diberikan beban geser pada balok. Observasi pada S1 mengindikasikan penurunan nilai *rate* kekuatan dari kondisi elastis (*linear*) ke kondisi plastis (*nonlinear*) yang terjadi ketika pelat ujung mengalami rotasi plastis terlebih dahulu. Rotasi plastis pada pelat ujung kemudian diikuti retak pada sambungan las yang menghubungkan sayap balok ke pelat ujung. Pengamatan pada S2, S3, dan S4 menunjukkan penurunan *rate* kekuatan dari kondisi elastis ke plastis, yang juga terjadi pada saat pelat ujung mengalami rotasi plastis akibat lentur. Rotasi plastis ini kemudian diikuti dengan terjadinya tekuk pada pelat badan balok.

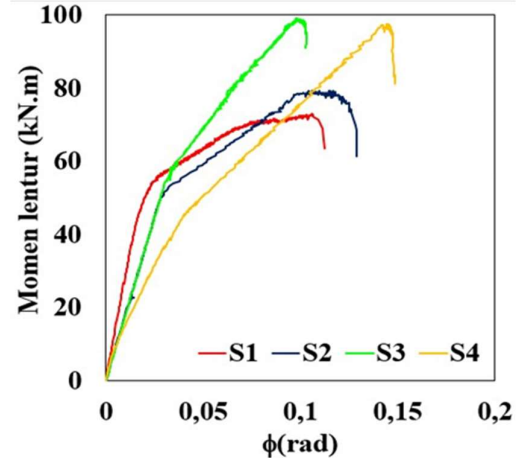
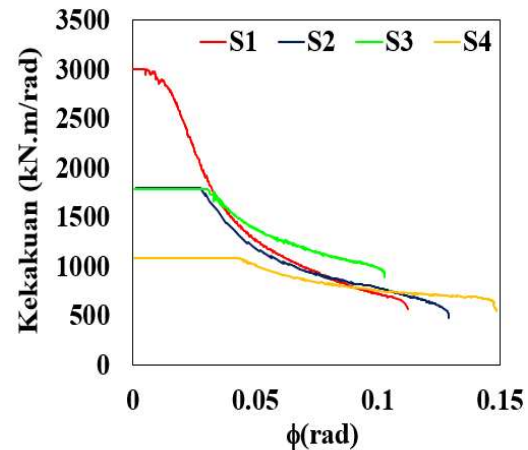
Hubungan kuat lentur sambungan dan deformasi pada pelat sayap di ujung balok diperlihatkan pada **Gambar**

Tabel 3. Deformasi bacaan *transducer* 1, 2, 3, dan 4 saat  $M_u = 70 \text{ kN.m}$ 

No	Transducer	Deformasi benda uji saat $M_u = 70 \text{ kN.m}$ (unit: mm)			
		S1	S2	S3	S4
1	Tr 1	28.73	20.05	13.61	14.53
2	Tr2	15.46	5.51	5.42	4.40
3	Tr 3	0.27	2.38	2.04	2.07
4	Tr 4	-	1.25	0.12	1.39

Tabel 4. Parameter saat kondisi puncak (ultimit)

No	Benda uji	Parameter	Nilai
1	S1	$M_{u1}$ (kN.m)	72.96
		$d_{u1-1}$ (mm)	42.54
		$d_{u2-1}$ (mm)	23.51
		$d_{u3-1}$ (mm)	3.23
		$d_{u4-1}$ (mm)	-
		$f_{u1}$ (rad)	0.11
2	S2	$M_{u2}$ (kN.m)	79.25
		$d_{u1-2}$ (mm)	30.44
		$d_{u2-2}$ (mm)	10.40
		$d_{u3-2}$ (mm)	-5.74
		$d_{u4-2}$ (mm)	-0.37
		$f_{u2}$ (rad)	0.12
3	S3	$M_{u3}$ (kN.m)	99.04
		$d_{u1-3}$ (mm)	25.55
		$d_{u2-3}$ (mm)	8.77
		$d_{u3-3}$ (mm)	8.12
		$d_{u4-3}$ (mm)	0.12
		$f_{u3}$ (rad)	0.10
4	S4	$M_{u4}$ (kN.m)	97.52
		$d_{u1-4}$ (mm)	23.30
		$d_{u2-4}$ (mm)	6.32
		$d_{u3-4}$ (mm)	-12.09
		$d_{u4-4}$ (mm)	-2.86
		$f_{u4}$ (rad)	0.14

Gambar 10. Hubungan momen lentur -  $\phi$ 

Gambar 11. Kekakuan benda uji

6. Kuat lentur sambungan diperoleh melalui perkalian antara gaya terhadap jarak antara gaya ke sambungan pelat ujung. Gambar menunjukkan bahwa S3 menunjukkan kuat lentur ultimit ( $M_{u3}$ ) terbesar yaitu sebesar 99.04 kN.m sedangkan S1, S2, S4 menunjukkan kuat lentur ultimit dengan nilai masing-masing 72.96 kN.m, 79.25 kN.m, dan 97.52

kN.m sebagaimana nilai-nilai tersebut juga diperlihatkan pada **Tabel 4**. Jika kuat lentur S2, S3, dan S4 dibandingkan dengan S1, maka perkuatan yang diberikan memberikan kenaikan kuat lentur sebesar 8.61 %, 35.75 %, dan 33.66 % secara berturut-turut. Dari gambar juga teridentifikasi bahwa S1 yang merupakan sambungan *ordinary end*

plate menunjukkan nilai perpindahan ultimit ( $\delta_{u1-1} = 42.54$  mm), dimana nilai ini lebih besar 39.76 %, 66.5 %, dan 82.56 % dibandingkan dengan deformasi ultimit S2, S3, S4. Deformasi ujung balok yang terkecil terklarifikasi pada S4 ( $\delta_{u1-4} = 23.3$  mm). Pengamatan pada momen lentur sembarang, misalnya pada  $M_u = 70$  kN.m untuk keempat sambungan, juga menunjukkan bahwa S1 memberikan lendutan ujung balok terbesar ( $\delta_{1-1} = 28.73$  mm) sebagaimana diperlihatkan pada **Tabel 3**, yang diyakini sebagai dampak tidak terdapatnya penyokong pada sambungan *ordinary end plate* dan mengakibatkan balok dapat berotasi lebih bebas dibandingkan sambungan *extended end plate*.

**Gambar 7** menunjukkan hubungan antara kuat lentur sambungan dan deformasi pada pelat ujung. Dari gambar teridentifikasi bahwa S1 memberikan deformasi terbesar ( $\delta_{u2-1} = 23.51$  mm). Hal ini mengindikasikan bahwa tidak adanya penyokong sayap (*haunch*) pada S1 memungkinkan balok dan pelat ujung dapat berotasi lebih bebas dibandingkan sambungan *extended end plate*. Deformasi pelat ujung yang terkecil terjadi pada S4 ( $\delta_{u2-4} = 6.23$  mm). Pengamatan pada momen lentur yang bernilai sama, sebagai contoh,  $M_u = 70$  kN.m, mengindikasikan bahwa S1 memberikan nilai deformasi lentur terbesar pada pelat ujung ( $\delta_{2-1} = 15.46$  mm) sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3**. Hal ini diyakini sebagai dampak lendutan besar pada ujung balok yang memberikan kontribusi rotasi yang signifikan pada pelat ujung S1, sehubungan tidak terdapatnya penyokong pada sayap balok.

Hubungan antara kuat lentur terhadap deformasi pelat badan di bagian ujung balok (pada posisi beban geser), diilustrasikan pada **Gambar 8**. Pengamatan menunjukkan bahwa S4 memberikan tekuk terbesar ( $\delta_{u3-4} = 12.09$  mm) yang mengindikasikan bahwa kekuatan dengan penambahan panjang penyokong secara efektif menunda kegagalan prematur pada sayap. Namun demikian, bagian pelat badan balok yang tanpa kekuatan dimungkinkan mengalami tekuk pelat badan akibat beban terpusat yang diberikan. Verifikasi pada nilai momen lentur yang sama, misalnya pada  $M_u = 70$  kN.m untuk keempat sambungan, mengindikasikan bahwa semua sambungan *extended end plate* memberikan nilai tekuk lebih besar dibandingkan S1 ( $\delta_{3-1} = 3.23$  mm), yang menunjukkan penambahan penyokong dapat memperpendek panjang efektif pelat badan. Hal ini dimungkinkan dapat menyebabkan tekuk pelat badan.

**Gambar 9** mengilustrasikan hubungan antara kuat lentur terhadap deformasi pelat badan yang berdekatan dengan perletakan. Gambar menunjukkan bahwa S4 memberikan deformasi yang paling besar ( $\delta_{u4-4} = 2.86$  mm). Selain itu,

verifikasi yang dilakukan pada momen lentur sembarang ( $M_u = 70$  kN.m) untuk keempat benda uji menunjukkan bahwa S3 memberikan nilai deformasi ( $\delta_{4-3}$ ) terkecil sebesar 0.12 mm dibandingkan benda uji yang lain. Hasil ini menunjukkan bahwa pemasangan pengaku pelat badan secara efektif dapat mengurangi deformasi tekuk pada pelat badan. Secara spesifik, deformasi hasil bacaan transducer 1, 2, 3, dan 4 pada  $M_u = 70$  kN.m diperlihatkan pada **Tabel 3**.

Dari **Tabel 4**, juga terlihat bahwa jika  $\delta_{u4-4}$  dibandingkan dengan  $\delta_{u3-4}$ , nilai  $\delta_{u3-4}$  lebih besar dibandingkan  $\delta_{u4-4}$ . Pola yang sama teridentifikasi untuk S2 dan S3 dimana nilai deformasi pelat badan pada bagian ujung balok lebih besar daripada deformasi pelat badan pada bagian yang berdekatan dengan perletakan.

**Gambar 10** mendeskripsikan nilai kuat lentur yang diobservasi terhadap rotasi balok. Rotasi balok didefinisikan sebagai rasio antara lendutan balok terhadap panjang efektif balok. Panjang efektif diperhitungkan mengingat sambungan *extended end plate* memiliki dudukan balok yang berasal dari sokongan (*haunch*). Dari gambar teridentifikasi bahwa S4 memiliki nilai rotasi plastis terbesar ( $\phi_{u4} = 0.14$  rad) dibandingkan dengan S1, S2, dan S3, walaupun S4 memiliki panjang efektif yang terkecil ( $L_{eff} = 160$  mm). Selain itu, rotasi plastis terkecil terdapat pada S3 ( $\phi_{u3} = 0.1$  rad), dimana S3 memiliki panjang efektif yang lebih besar dibandingkan S4.

Untuk menampilkan hasil yang lebih rinci, nilai momen, deformasi, dan rotasi pada saat kondisi puncak (ultimit) yang diperoleh dari kajian eksperimental, disajikan pada **Tabel 4**.

### 3.2 Pembahasan

Pengujian yang dilakukan di laboratorium memberikan nilai beban geser dan deformasi sayap di bagian ujung balok dimana dari kedua parameter ini diobservasi parameter kekakuan dari setiap benda uji. Terdapat dua kekakuan yang diteliti yaitu kekakuan elastis dan inelastis. Kekakuan elastis mengacu ke kemiringan (*slope*) dari hubungan linier beban-deformasi sayap balok. Sedangkan, kekakuan inelastis mengacu pada kondisi pasca leleh yang didefinisikan sebagai rasio beban geser pasca leleh terhadap deformasi pasca leleh pada sayap balok.

**Gambar 11** mendeskripsikan perbandingan kekakuan benda uji selama historis pembebanan. Gambar menunjukkan bahwa sambungan *ordinary end plate* (S1) memberikan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan sambungan *extended end plate* (S2, S3, dan S4). Fenomena ini diyakini sebagai efek kekencangan baut yang tidak seragam pada sambungan *ordinary* dan *extended end plate*. Pengencangan baut yang tidak menggunakan kunci

torsi mengakibatkan kekencangan baut yang bervariasi yang berdampak pada selisih kuat lentur sambungan *ordinary* dan *extended end plate* yang tidak jauh berbeda (selisih terbesar 36 %). **Gambar 11** juga mengilustrasikan degradasi kekakuan benda. Pada studi ini, hasil pengujian di laboratorium juga diverifikasi terhadap kuat lentur teoritis, dimana untuk memperoleh kuat lentur teoritis yang sebenarnya, peneliti mengamati perilaku benda uji selama historis pembebanan. Dari pengamatan yang dilakukan, penurunan *rate* kekuatan dari elastis ke plastis pada S1, S2, S3, dan S4, terjadi pada saat pelat ujung mengalami leleh dan rotasi plastis akibat lentur, sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Pengamatan pada kondisi leleh, ultimit, dan teoritis sambungan (**Tabel 5**) juga mengindikasikan bahwa pada saat beban leleh ( $P_{yi}$ ) tercapai (rotasi terjadi pada pelat ujung) untuk keempat benda uji, nilai *bearing strength* pada pelat badan ( $P_{wi}$ ) yang

dihitung menurut **Persamaan (15)**, terindikasi lebih besar dibandingkan  $P_{yi}$ . Hal ini memberikan informasi bahwa rotasi pelat ujung terjadi terlebih dahulu dibandingkan deformasi pada pelat badan. Dengan demikian, kuat lentur teoritis sambungan yang diperhitungkan mengacu ke kapasitas pelat uji dari kondisi elastis ke inelastis. Dari gambar, terlihat bahwa S1 memiliki degradasi kekakuan yang lebih curam dibandingkan dengan S2, S3, dan S4. Hal ini dimungkinkan mengingat S1 merupakan sambungan pelat ujung tanpa perkuatan sayap yang memberikan peningkatan kekuatan pasca leleh yang tidak signifikan. Selain itu, S4 terindikasi memiliki degradasi kekakuan yang paling landai, yang dimungkinkan sehubungan masih signifikannya peningkatan kekuatan signifikan pasca leleh (walaupun *rate* peningkatan kekuatannya lebih rendah dari kondisi elastis).

**Tabel 5. Parameter untuk kondisi leleh, ultimit, dan teoritis**

No	Benda uji	Parameter	Nilai	No	Benda uji	Parameter	Nilai
1	S1	$M_{u1}$ (kN.m)	72.96	3	S3	$M_{u3}$ (kN.m)	99.04
		$M_{y1}$ (kN.m)	48.12			$M_{y3}$ (kN.m)	53.36
		$M_{n1}$ (kN.m)	33.50			$M_{n3}$ (kN.m)	49.82
		$P_{u1}$ (kN)	182.40			$P_{u3}$ (kN)	247.60
		$P_{y1}$ (kN)	120.30			$P_{y3}$ (kN)	133.40
		$P_{n1}$ (kN)	83.76			$P_{n3}$ (kN)	124.56
		$P_{w1}$ (kN)	191.42			$P_{w3}$ (kN)	191.42
		$f_{u1}$ (rad)	0.11			$f_{u3}$ (rad)	0.10
		$f_{v1}$ (rad)	0.02			$f_{v3}$ (rad)	0.03
2	S2	$m_1$	5.67	4	S4	$m_3$	3.28
		$M_{u2}$ (kN.m)	79.25			$M_{u4}$ (kN.m)	97.52
		$M_{y2}$ (kN.m)	52.14			$M_{y4}$ (kN.m)	51.60
		$M_{n2}$ (kN.m)	49.82			$M_{n4}$ (kN.m)	49.82
		$P_{u2}$ (kN)	198.12			$P_{u4}$ (kN)	243.80
		$P_{y2}$ (kN)	130.35			$P_{y4}$ (kN)	129.00
		$P_{n2}$ (kN)	124.56			$P_{n4}$ (kN)	124.56
		$P_{w2}$ (kN)	191.42			$P_{w4}$ (kN)	191.42
		$f_{u2}$ (rad)	0.12			$f_{u4}$ (rad)	0.14
		$f_{y2}$ (rad)	0.03			$f_{y4}$ (rad)	0.05
		$m_2$	3.72			$m_4$	2.74

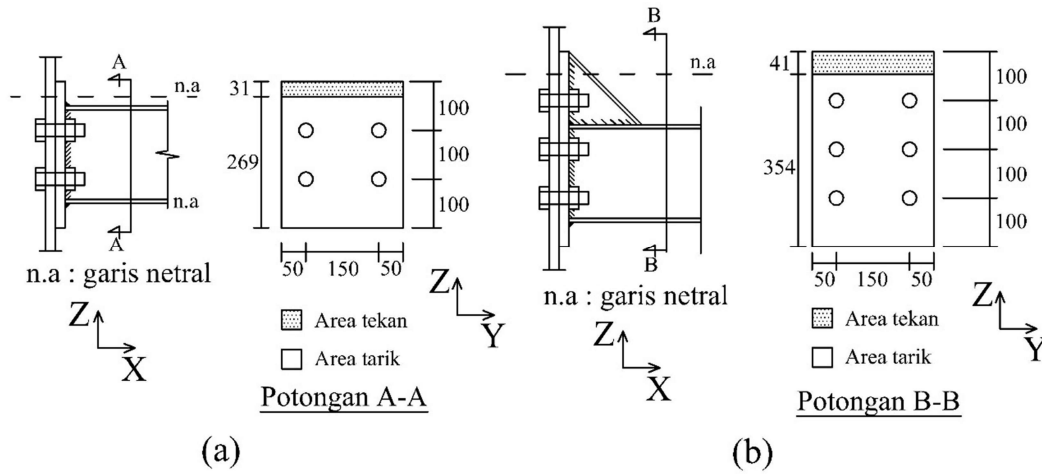
Catatan :

$M_{ui}$ ,  $M_{yi}$ ,  $M_{ni}$  : Kuat lentur ultimit, kuat lentur leleh, dan kuat lentur teoritis dari benda uji ke i

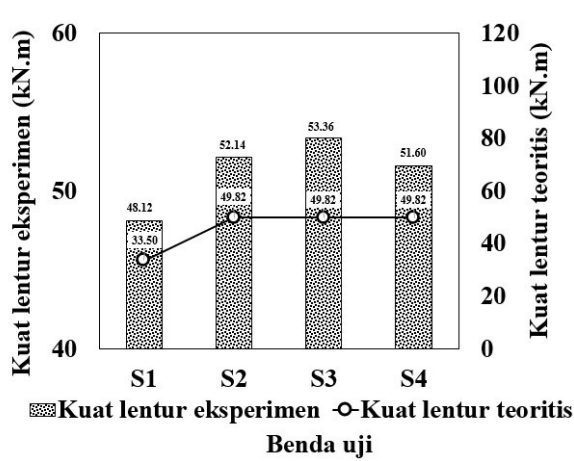
$P_{ui}$ ,  $P_{yi}$ ,  $P_{ni}$ ,  $P_{wi}$  : Beban tekan ultimit, beban leleh, kuat tekan nominal, dan bearing strength dari web pada benda uji ke i

$f_{ui}$ ,  $f_{vi}$  : Rotasi ultimit dan rotasi leleh benda uji ke i

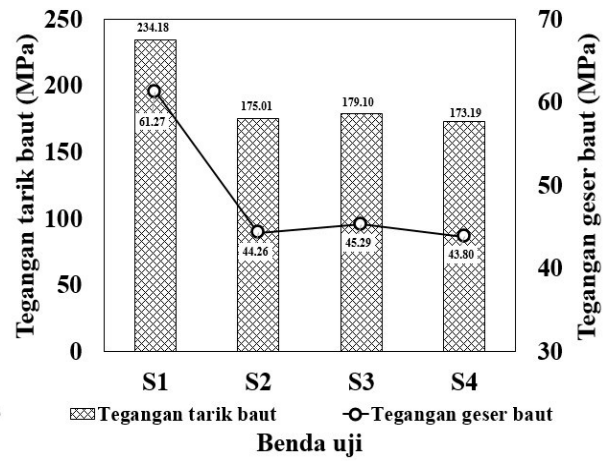
$m_i$  : Daktilitas benda uji ke i



Gambar 12. Tinggi blok tekan dan blok tarik sambungan (unit: mm): (a) *Ordinary end plate connection*; (b) *Extended end plate connection*



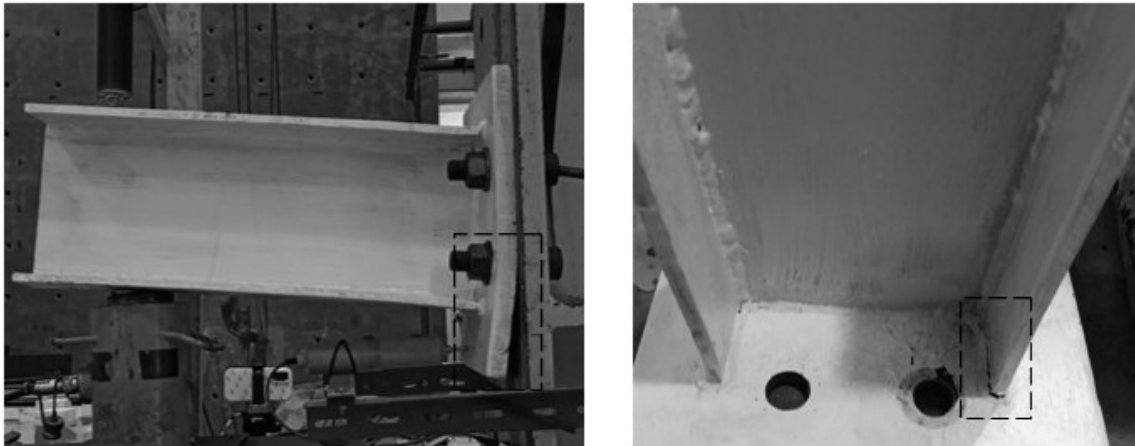
Gambar 13. Kuat lentur sambungan pelat ujung



Gambar 14. Tegangan geser dan tarik baut

Tabel 6. *Demand-capacity ratio (D/C) baut pada benda uji*

No	Benda uji	Tegangan tarik baut	Tegangan ultimit baut	D/C
		(MPa)	(MPa)	
1	S1	234.18	729	0.32
2	S2	175.01	729	0.24
3	S3	179.10	729	0.25
4	S4	173.19	729	0.24



Gambar 15. Ragam kegagalan S1: (a) Gagal lentur pada pelat ujung; (b) Retak pada sayap di perletakan balok

Pada studi ini, hasil pengujian di laboratorium juga diverifikasi terhadap kuat lentur teoritis, dimana untuk memperoleh kuat lentur teoritis yang sebenarnya, peneliti mengamati perilaku benda uji selama historis pembebanan. Dari pengamatan yang dilakukan, penurunan *rate* kekuatan dari elastis ke plastis pada S1, S2, S3, dan S4, terjadi pada saat pelat ujung mengalami leleh dan rotasi plastis akibat lentur, sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Pengamatan pada kondisi leleh, ultimit, dan teoritis sambungan (Tabel 5) juga mengindikasikan bahwa

Selain itu, dari Tabel terlihat bahwa untuk semua sambungan *extended end plate* (S2, S3, dan S4),  $P_{ui}$  terindikasi lebih besar dibandingkan dengan  $P_{wi}$  yang menunjukkan sambungan *extended end plate* mengalami gagal tekuk pada pelat badan.

Daktilitas untuk keempat tipe sambungan juga diperlihatkan pada Tabel 5. Daktilitas didefinisikan sebagai rasio antara rotasi ultimit ( $\phi_u$ ) terhadap rotasi leleh ( $\phi_y$ ) yang merujuk ke Gambar 10. Tabel 5 menunjukkan bahwa daktilitas tertinggi terdapat pada S1 ( $\mu_l = 5.67$ ). Hal ini diyakini sebagai pengaruh tidak terdapatnya penyokong di sisi atas pelat sayap yang memberikan kemampuan rotasi pasca leleh yang lebih besar pada sambungan *ordinary end plate* (S1).

Untuk memperoleh kuat lentur teoritis, perhitungan diawali dengan menghitung nilai  $s$  dari Persamaan (12) dan menginput nilai geometri pelat ujung yaitu  $h_o, h_1, h_2, p_{fio}, p_{fo}, p_b, b_p, s$ , dan  $g$  ke Persamaan (10) dan (11) untuk memperoleh parameter garis leleh ( $Y_{i(i=1,2)}$ ). Persamaan (10) dan (11) menyatakan  $Y_{i(i=1,2)}$  untuk masing-masing sambungan pelat ujung *ordinary* dan *extended end plate*. Parameter geometri pelat ujung yang ada pada Persamaan (10)

pada saat beban leleh ( $P_{yi}$ ) tercapai (rotasi terjadi pada pelat ujung) untuk keempat benda uji, nilai *bearing strength* pada pelat badan ( $P_{wi}$ ) yang dihitung menurut Persamaan (15), terindikasi lebih besar dibandingkan  $P_{yi}$ . Hal ini memberikan informasi bahwa rotasi pelat ujung terjadi terlebih dahulu dibandingkan deformasi pada pelat badan. Dengan demikian, kuat lentur teoritis sambungan yang diperhitungkan mengacu ke kapasitas pelat ujung dalam menahan lentur pada saat pelat ujung mencapai leleh pertama (*first yield*).

diilustrasikan pada Gambar 2. Kuat lentur teoritis kemudian diperoleh dengan mensubstitusikan nilai  $t_p, \phi_b, F_{py}, Y_{i(i=1,2)}$ , dan  $\gamma_1$  ke Persamaan (9).

Gambar 12 memberikan perbandingan antara tinggi blok tekan ( $a$ ) dan tarik pada sambungan *ordinary* dan *extended end plate* yang diperoleh dari kajian teoritis. Dari gambar, terlihat bahwa keseluruhan baut, baik pada sambungan *ordinary* maupun *extended end plate* memikul tarik yang berasal dari momen sambungan. Selain itu, sambungan *extended end plate* memiliki jumlah baut yang lebih banyak (6 baut) dibandingkan sambungan *ordinary end plate* (4 baut) dalam arah tarik, yang memberikan kuat lentur teoritis lebih besar pada sambungan *extended end plate*. Sehubungan momen yang bekerja, kedua sambungan juga memikul tekan pada pelat ujung dengan luas area yang berbeda yaitu (31 x 250) mm dan (41 x 250) mm untuk masing-masing sambungan *ordinary* dan *extended end plate*, seperti terlihat pada Gambar 12. Sebagaimana terlihat pada gambar, tidak terdapat baut yang memberikan kontribusi dalam menahan gaya tekan akibat momen.

**Gambar 13** mendeskripsikan perbandingan kuat lentur eksperimen dan kuat lentur teoritis. Dari gambar, terlihat bahwa pemanfaatan sambungan *extended end plate* dapat meningkatkan kuat lentur, dimana kajian difokuskan pada perilaku elastis. Selain itu, **Gambar 13** juga menunjukkan bahwa kuat lentur eksperimen (saat leleh terjadi pada pelat ujung) memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan kuat lentur teoritis, pada keseluruhan benda uji. Hal tersebut dapat terjadi mengingat pengamatan kuat lentur eksperimen mungkin saja dilakukan pada saat pada saat pelat telah mengalami rotasi dimana tegangan pada sebagian besar pelat ujung telah mencapai tegangan leleh sehingga menghasilkan kuat lentur yang lebih besar. Sedangkan kuat lentur teoritis diperhitungkan dengan asumsi dimana pelat ujung masih dalam kondisi leleh pertama (*first yield*), sesuai **Persamaan (9)**.

Observasi terhadap tegangan tarik dan tegangan geser pada baut di sambungan pelat ujung juga dilakukan. Nilai kedua tegangan mengacu kepada momen dan gaya geser yang diperoleh dari kajian eksperimental saat leleh terjadi pada pelat ujung. Tegangan tarik diperoleh melalui **Persamaan (5)** dan tegangan geser dihitung dengan **Persamaan (6)**. Dalam memperhitungkan tegangan tarik, gaya tarik satu baris baut (**Persamaan (4)**) yang digunakan adalah gaya tarik satu baris baut yang paling bawah ( $T_k$ ) sesuai **Gambar 12(a)** dan **12(b)**.

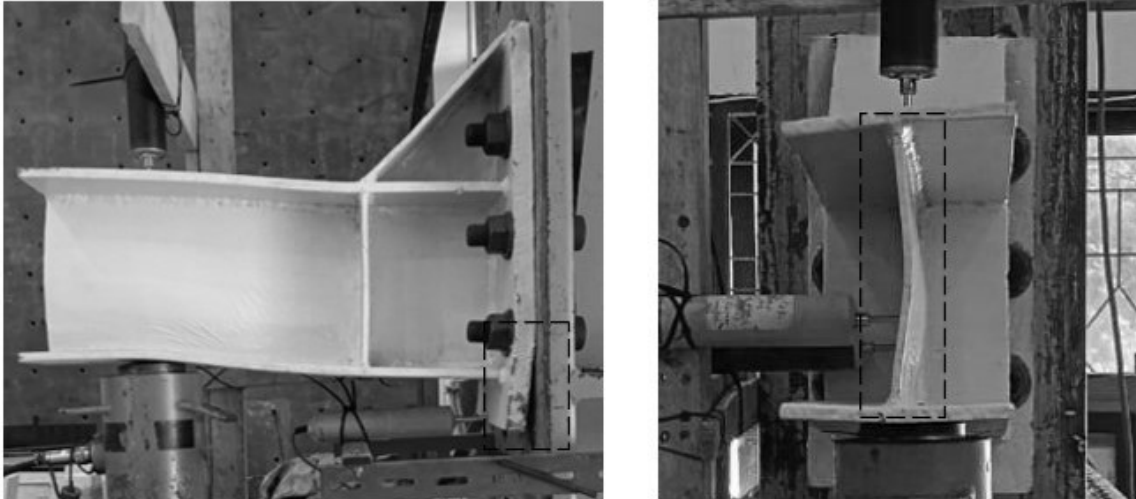
Hubungan antara tegangan tarik dan tegangan geser untuk setiap benda uji diperlihatkan pada **Gambar 14**. Dari gambar terlihat bahwa tegangan geser terbesar terjadi pada S1 dengan nilai 61.27 MPa. Hal ini dimungkinkan, mengingat walaupun S1 memiliki gaya geser baut yang paling kecil (momen berbanding lurus dengan gaya geser), S1 memiliki jumlah baut yang paling sedikit (4 baut). Fakta ini

berkontribusi untuk menghasilkan tegangan geser baut paling besar sebagaimana diperoleh dari **Persamaan (6)**. Selain itu, dari gambar juga terindikasi bahwa S1 juga memiliki tegangan tarik baut terbesar walaupun memiliki momen terkecil. Hal ini dimungkinkan mengingat momen inersia penampang transformasi ( $I$ ) pada S1 jauh lebih kecil dibandingkan momen inersia penampang transformasi pada S2, S3, dan S4. Analisis yang merujuk ke **Persamaan (3)** memberikan  $I$  sebesar  $3480.04 \text{ cm}^4$  untuk S1 dan  $I$  sebesar  $7727.29 \text{ cm}^4$  untuk S2, S3, dan S4. Sehubungan besarnya disparitas inersia, **Gambar 14** juga menunjukkan selisih (perbedaan) tegangan tarik yang signifikan antara S1 (sambungan *ordinary end plate*) terhadap S2, S3, dan S4 (sambungan *extended end plate*).

Verifikasi terhadap *demand-capacity ratio* (D/C) juga dilakukan dan mengacu kepada rasio tegangan tarik baut ( $(f_t)_x$ ) terhadap tegangan ultimit baut ( $\phi(F_u^b)$ ). Nilai tegangan tarik yang berasal dari kajian eksperimental didefinisikan melalui **Persamaan (6)**. Hasil yang diperoleh disajikan pada **Tabel 6**. Dari tabel, terlihat bahwa S1 (sambungan *ordinary end plate*) memiliki D/C terbesar walaupun menahan momen yang terkecil. Hal ini dimungkinkan mengingat S1 memiliki jumlah baut yang paling sedikit (4 baut) sehingga gaya tarik yang harus ditahan oleh setiap baut menjadi lebih besar khususnya baut terbawah pada sambungan (**Gambar 12**). Sambungan *extended end plate* (S2, S3, dan S4) memiliki D/C yang lebih kecil walaupun menahan momen lentur yang lebih besar. Sambungan *extended end plate* yang memiliki jumlah baut yang lebih banyak (6 baut) akan menyebabkan tegangan tarik baut menjadi lebih kecil karena gaya tarik didistribusikan ke jumlah baut yang lebih banyak.



**Gambar 16.** Ragam kegagalan S2: (a) Gagal lentur pada pelat ujung; (b) Tekuk pada pelat badan di posisi beban geser



**Gambar 17. Ragam kegagalan S3: (a) Gagal lentur pada pelat ujung; (b) Tekuk pada pelat badan di posisi beban geser**

Ragam kegagalan pada benda uji ditunjukkan pada **Gambar 15** sampai **Gambar 18**. **Gambar 15** mengindikasikan kegagalan berupa gagal lentur berupa rotasi plastis pada pelat ujung untuk S1. Selain itu terdapat retak (crack) di bagian sayap pada area perletakan. Hal ini mengindikasikan bahwa pelat ujung dengan ketebalan yang digunakan, tidak cukup kuat dalam memikul tarik akibat momen ujung. Pengamatan pada pelat badan balok menunjukkan tidak terdapat pengelupasan cat, tekuk maupun retak akibat pembebanan. Hal ini juga diperkuat melalui nilai bearing strength pelat badan ( $Pw1 = 191.42 \text{ kN}$ ) yang lebih besar dibandingkan beban tekan ( $Pu1 = 182.4 \text{ kN}$ ) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5, yang mengindikasikan bahwa gagal tekuk pada pelat badan akibat beban tekan tidak terjadi pada S1.

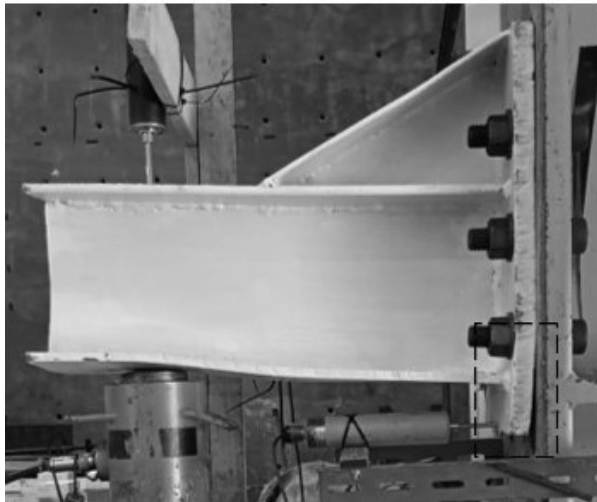
**Gambar 16** memperlihatkan mode kegagalan pada S2. Kegagalan yang teridentifikasi adalah gagal lentur berupa rotasi plastis pada pelat ujung. Hal ini menunjukkan bahwa pelat ujung butuh untuk dipertebal untuk meningkatkan kapasitas lenturnya. Selain itu, tekuk juga teridentifikasi pada pelat badan, yang dimungkinkan sehubungan besarnya beban terpusat yang bekerja pada sayap. Pengamatan pada nilai kelangsingan penampang  $h/tw$  dan  $b/2tf$  (Persamaan 13 dan 14), menunjukkan bahwa kedua nilai kelangsingan masih berada dibawah batas izin yang mengindikasikan penampang adalah penampang kompak. Namun demikian, observasi pada nilai bearing strength pelat badan balok (Persamaan 15), sebagaimana pada **Tabel 5** menunjukkan bahwa nilai bearing strength pelat badan ( $Pw2 = 191.42 \text{ kN}$ ) adalah lebih kecil dibandingkan beban tekan ( $Pu2 = 198.12 \text{ kN}$ ) yang mengakibatkan tekuk pelat badan pada S2.

Ragam kegagalan pada S3 diperlihatkan pada **Gambar 17**. Dari gambar terlihat bahwa terjadi rotasi plastis pada pelat ujung yang mengindikasikan gagal lentur. Selain itu tekuk diidentifikasi pada pelat badan khususnya pada bagian ujung balok di posisi beban geser. Pengamatan pada area pelat badan menunjukkan tekuk yang sangat signifikan dengan nilai deformasi sebesar  $8.12 \text{ mm}$  (**Tabel 3**). Pengamatan deformasi pelat badan pada bagian yang berdekatan dengan perletakan memberikan informasi bahwa tidak terdapat tekuk pada area tersebut. Perkuatan berupa penambahan pengaku badan pada bagian yang segaris dengan ujung penyokong mengakibatkan tekuk akibat beban terpusat beralih area lain yang lebih lemah yaitu pada bagian pelat badan yang tidak diperkuat dengan pengaku (pada posisi pembebanan). Pengamatan terhadap bearing strength yang disajikan pada **Tabel 5** juga menunjukkan bahwa nilai bearing strength pelat badan ( $Pw3 = 191.42 \text{ kN}$ ) lebih kecil dibandingkan beban tekan ( $Pu3 = 247.6 \text{ kN}$ ) yang mengakibatkan kegagalan berupa tekuk pelat badan pada S3.

**Gambar 18** mengilustrasikan karakteristik kegagalan pada S4 dimana gagal lentur terjadi pada pelat ujung dan tekuk pelat badan di bagian ujung balok (pada posisi beban geser). Observasi pada bagian pelat badan menunjukkan tekuk yang sangat signifikan dengan nilai deformasi sebesar  $12.09 \text{ mm}$  (**Tabel 3**). Nilai ini lebih besar dibandingkan tekuk pelat badan pada S2 dan S3. Penambahan panjang penyokong pada S4 terindikasi mengurangi kemungkinan tekuk pelat badan pada bagian yang berdekatan dengan perletakan, namun memicu terjadinya tekuk pelat badan akibat beban terpusat pada bagian lain yang tidak diperkuat yaitu pada pelat badan yang berada segaris dengan posisi beban

geser. Verifikasi bearing strength pelat badan balok yang ditampilkan pada **Tabel 5**, menunjukkan bahwa bearing strength pelat badan balok ( $P_w4 = 191.42 \text{ kN}$ ) yang lebih kecil dibandingkan beban

tekan ( $P_u4 = 243.8 \text{ kN}$ ) yang berakibat pada tekuk pelat badan pada S4.



Gambar 18. Ragam kegagalan S4: (a) Gagal lentur pada pelat ujung; (b) Tekuk pada pelat badan di posisi beban geser

#### 4. Kesimpulan

1. Kajian eksperimental memberikan informasi bahwa kombinasi kekuatan berupa penambahan area sambungan dan pengaku badan pada balok memberikan kuat lentur yang paling baik, dimana dengan adanya penyokong pada area sayap, dimungkinkan untuk menunda kegagalan lentur sayap dan pemasangan pengaku badan di bagian yang segaris dengan ujung penyokong dapat meminimalkan tekuk pelat badan pada area tersebut.
2. Kuat lentur saat leleh (kajian eksperimental) menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan kuat lentur teoritis yang mengindikasikan kuat lentur teoritis lebih konservatif dibandingkan kuat lentur eksperimental.
3. Sambungan *ordinary end plate* menunjukkan ragam kegagalan berupa gagal lentur (rotasi plastis) pada pelat ujung dan retak (crack) pada sayap di area perletakan disebabkan momen ujung yang bekerja memberikan kontribusi gaya tarik yang besar pada sambungan.
4. Sambungan *extended end plate* memperlihatkan kegagalan berupa gagal lentur pada pelat ujung akibat momen, dan kegagalan berupa tekuk pelat badan akibat beban terpusat pada bagian yang tidak diperkuat yaitu pada pelat badan yang berada segaris dengan posisi beban geser.

#### Daftar Pustaka

- Abidelah, A., Bouchaïr, A., Kerdal, D. E., 2012, Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners, *Journal of Constructional Steel Research*, 76, 13–27.
- ANSI/AISC 360-10, 2010. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.
- Baei, M., Ghassemieh, M., Goudarzi, A., 2012, Numerical Modelling Of End-plate Moment Connection Subjected To Bending And Axial Forces, *Journal of Mathematics and Computer Science*, 04(03), 463–472.
- Ekhlasii, F., Saberi, H., Ahmadvand, M., Saberi, V., 2018, Parametric Investigation of Cyclic Behavior of Bolt End Plate Connections, *Iranian Society of Structural Engineering*.
- Gao, J. D., Yuan, H. X., Du, X. X., Hu, X. B., & Theofanous, M., 2020. Structural behaviour of stainless steel double extended end-plate beam-to-column joints under monotonic loading. *Thin-Walled Structures*, 151.
- Ismail, R. E. S., Fahmy, A. S., Khalifa, A. M., Mohamed, Y. M., 2016, Numerical study on ultimate behaviour of bolted end-plate steel connections, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(1), 1–22.

- Karasu, A., Vatansever, C., Alçiçek, H. E., 2018, An investigation of the behavior of header end-plate connections under monotonic loading, *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 4(3), 108.
- Lin, T., Wang, Z., Hu, F., Wang, P., 2022, Finite-Element Analysis of High-Strength Steel Extended End-Plate Connections under Cyclic Loading, *Materials*, 15(8).
- Luo, L., Du, M., Yuan, J., Shi, J., Yu, S., Zhang, Y., 2020a, Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection, *Materials*, 13(22), 1–30.
- Luo, L., Qin, J., Zhao, D., Wu, Z., 2020b, Seismic behavior of extended end-plate connections subjected to cyclic loading on the top-side of the column, *Materials*, 13(17).
- Moestopo, M., Panjaitan, M. A. R., 2012, Kajian Eksperimental Peningkatan Kinerja Link Geser pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik, *Jurnal Teknik Sipil*, 19(2), 93-102.
- Murray, T. M., Shoemaker, W. L., 2010. Design Guide of Moment End-Plate Connections, *American Institute of Steel Construction*.
- Nuñez, E., Lichtemberg, R., Herrera, R., 2020. Cyclic performance of end-plate biaxial moment connection with HSS columns, *Metals*, 10(11), 1–25.
- Panjaitan, A., Hasibuan, P., Shimizu, M., 2023, Study on unsymmetrical steel gable frames constructed from built-up columns and rafters, *AIP Conference Proceedings 2711, 060010 (2023)*, 1-8.
- Panjaitan, A., Hasibuan, P., Putra, R., Afifuddin, M., Fauzi, M., Haiqal, M., 2024, Flexural strength of end-plate connection with several different bolt arrangements, *Journal of Physics: Conference Series 2916(1)*, 1-11.
- Sathian, A., Geetha, P. R., 2020, Study on behaviour of extended end-plate bolted connections subjected to cyclic loading, *International Research Journal of Engineering and Technology*. 7(8).
- Satish, P. R., Chougule, V. A., 2020, Analytical study of extended end plate connections in steel structures, *International Research Journal of Engineering and Technology*. 7(6).
- Shaheen, M. A., Andrew, A. S., Cunningham, L. S., 2020, A novel device to improve robustness of end plate beam-column connections. *Structures*, 28, 2415–2423.
- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y., Bijlaard, F. S. K., 2010, Monotonic Loading Tests on Semi-Rigid End-Plate Connections with Welded I-Shaped Columns and Beams, *Advances in Structural Engineering*, 13(2).
- SNI 03-1729-2020, Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung. Badan Standar Nasional.
- Zingoni A., 2017 *Shell structures in civil and mechanical engineering*, 2nd ed. ICE Publishing.