

## TAHANAN LATERAL SAMBUNGAN GESER GANDA KAYU KARET FJLB – PELAT BESI DENGAN ALAT SAMBUNG BAUT

Sherly Octavia<sup>1</sup>, Ali Awaludin<sup>2\*</sup> dan Urwatul Wusqo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta

Email: [sherlyoctavia@mail.ugm.ac.id](mailto:sherlyoctavia@mail.ugm.ac.id)

<sup>2</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika 2 Yogyakarta

Email: [ali.awaludin@ugm.ac.id](mailto:ali.awaludin@ugm.ac.id)

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir Bandung

Email: [urwatul.wusqo@polban.ac.id](mailto:urwatul.wusqo@polban.ac.id)

### ABSTRACT

Timber Instant House (RIKA) is one of the recommended earthquake-resistant houses during the post-disaster reconstruction project. However, in practice, this instant house faces problems with timber material availability. One solution that can be offered is to use Finger Joint Laminated Board (FJLB) material as a structural component. For the design of earthquake-resistant buildings, one of the components that need to be reviewed carefully is the connection component. In this study, the lateral resistance of the FJLB connection with steel will be reviewed. The connection tool used is a bolt. The joints are tested using a monotonic load in the direction parallel to the grain and perpendicular to the grain. The test results on 12 test objects with the ASTM D-5764-97a standard were then compared with the results of manual calculations using the European Yield Model (EYM) theory listed in Eurocode 5. From the test, the average value of the lateral resistance per bolt was 18.63 kN (parallel to the grain) and 15.22 kN (perpendicular to the grain). The ratio between the value of lateral resistance of the test results and theoretical using EYM is close to a value of 1, where most of the connection failure modes from the test results are close to the theoretical connection failure modes. Thus, it can be concluded that applying the EYM theory to the FJLB connection with steel using a bolt connection is still relevant and gives results that are quite close to the test results.

Keywords: Bolted joint, Eurocode 5, RIKA, Steel-to-Timber Connection, Lateral Resistance

### ABSTRAK

Rumah Instan Kayu (RIKA) merupakan salah satu rumah tahan gempa yang direkomendasikan untuk percepatan perbaikan pembangunan rumah terdampak bencana memiliki tantangan terutama dalam penyediaan material kayu. Salah satu solusi yang dapat ditawarkan adalah dengan menggunakan material *Finger Joint Laminated Board* (FJLB) sebagai komponen struktur. Untuk desain bangunan tahan gempa, salah satu komponen yang perlu ditinjau dengan teliti adalah komponen sambungan. Pada penelitian ini, tahanan lateral dari sambungan FJLB dengan baja akan dikaji. Alat sambung yang digunakan adalah baut. Sambungan diuji dengan menggunakan beban monotonik pada arah sejajar serat dan tegak lurus serat. Hasil pengujian pada 12 benda uji dengan standar ASTM D-5764-97a kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan manual menggunakan teori *European Yield Model* (EYM) yang tertera pada *Eurocode 5*. Dari pengujian, didapatkan rata-rata nilai tahanan lateral per baut adalah sebesar 18,63 kN (sambungan sejajar serat) dan 15,22 kN (sambungan tegak lurus serat). Rasio antara nilai tahanan lateral hasil pengujian dan perhitungan manual menggunakan teori EYM mendekati nilai 1, dimana sebagian besar mode kegagalan sambungan dari hasil pengujian mendekati mode kegagalan sambungan secara teoritis. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aplikasi teori EYM pada sambungan FJLB dengan baja menggunakan alat sambung baut masih relevan dan memberikan hasil yang sesuai dengan hasil pengujian.

Kata kunci: Sambungan Baut, Eurocode 5, FJLB, RIKA, Tahanan Lateral Sambungan

## 1. PENDAHULUAN

Pada Agustus 2018, beberapa tipe rumah tahan gempa direkomendasikan untuk percepatan perbaikan atau pembangunan rumah terdampak bencana gempa di Nusa Tenggara Barat. Salah satunya, RIKA, Rumah Instan Kayu sesuai Gambar 1. RIKA memiliki beberapa kelebihan diantaranya proses konstruksi lebih cepat, ringan, lebih tahan gempa, dan ramah lingkungan. Dalam realisasi RIKA di Nusa Tenggara Barat terdapat beberapa masalah seperti keterbatasan pengadaan dan distribusi material serta kurangnya alternatif pengembangan denah rumah sesuai ekonomi

Corresponding Author

E-mail Address : [ali.awaludin@ugm.ac.id](mailto:ali.awaludin@ugm.ac.id)

penghuni. Oleh karena itu, penyediaan RIKA di Indonesia secara garis besar memiliki tantangan dalam ketersediaan material kayu.



Gambar 1. Rumah Instan Kayu (Sumber: ciptakarya.pu.go.id).

*Finger Joint Laminated Board* (FJLB) merupakan salah satu produk kayu rekayasa yang terdiri dari potongan kayu solid dengan sambungan ujung yang serupa, runcing, dan simetris, dibentuk dengan mesin, direkatkan bersama. Pada proses pembuatan FJLB terdapat proses pengempaan yang menjadikan berat jenis (*density*) kayu solid semakin bertambah dan dapat diaplikasikan sebagai komponen bangunan. Pembuatan *finger joint* FJLB sendiri diatur dalam BS EN 385:2001 dengan persyaratan yang diberikan berupa persyaratan komponen struktur kayu, bahan perekat, kadar air, serta sistem pemotongan dan perekatan. FJLB yang sering digunakan biasanya terbuat dari kayu karet (*Havea Brasiliensis*) dan kayu pinus (*Pinus Merkusii*), yang umum digunakan sebagai pintu dan furnitur interior berkualitas tinggi. Dalam upaya pemanfaatan material kayu yang berkelanjutan dan pendayagunaan teknologi dalam pengembangan RIKA, FJLB (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2) direkomendasikan sebagai komponen struktural dengan tambahan sistem sambungan untuk meningkatkan kekuatan lateral struktur saat menahan gaya gempa. Dalam penelitian ini, kekuatan sambungan FJLB kayu karet dengan pelat baja menggunakan alat sambung baut dievaluasi dengan menggunakan beban monotonik. Diharapkan, kegagalan sambungan yang bersifat duktail terjadi terlebih dahulu sebelum sambungan mengalami kegagalan yang bersifat getas.

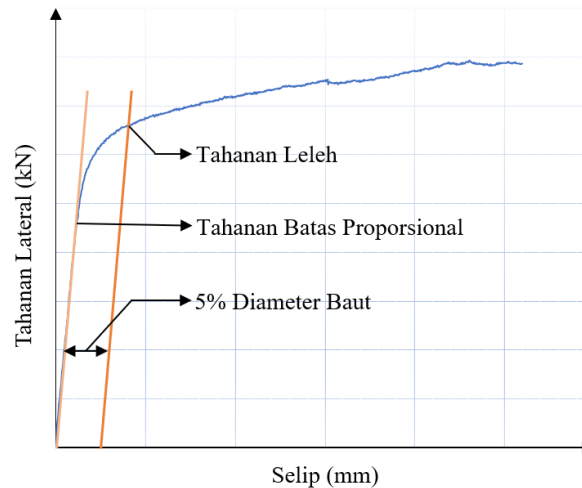


Gambar 1. Finger Joint Laminated Board (FJLB).

Pengaplikasian FJLB sebagai komponen struktural bangunan telah dilakukan oleh beberapa peneliti, seperti Lara-Bocanegra, dkk. (2017) dan Afif, dkk. (2022). Hasil penelitian menunjukkan mode kegagalan FJLB dominan terjadi sepanjang permukaan sambungan atau *finger joint*. Namun, balok FJLB tetap berada dalam kategori respon elastik dengan pengukuran regangan masih jauh di bawah batas keruntuhan material tarik. Perhitungan tahanan lateral beban sambungan prategang baja ke kayu juga telah dilakukan oleh Awaludin, dkk. (2008) dan Gečys, dkk. (2019). Kedua penelitian menunjukkan pengaruh kapasitas dukung beban terhadap bentuk kurva *slip* (selip) sambungan pada perpindahan yang lebih besar, dengan catatan modulus selip linier dibatasi pada bagian elastis kurva. Prediksi ketahanan maksimum sambungan ditentukan dengan menjumlahkan hasil kali gaya yang bekerja pada masing-masing baut dan jarak baut ke pusat massa kelompok baut. Hasil penelitian menunjukkan sambungan prategang baut memberikan peningkatan tahanan lateral sambungan dan kegagalan dalam bentuk sudut tekuk pengencang yang lebih kecil daripada sambungan nonprategang.

Dalam perhitungan tahanan lateral sambungan digunakan acuan perhitungan *European Yield Model* (EYM). Tiga parameter utama dalam perhitungan tahanan lateral sambungan berdasarkan metode EYM, yaitu kuat tumpu kayu, kuat lentur sambungan, dan geometri sambungan kayu. Dalam pengujian, serat kayu di bawah alat sambung berlaku elastik dan sambungan baut berlaku inelastik atau deformasi plastik untuk disipasi energi gempa. Mekanisme

plastisitas pada alat sambung dan sambungan kayu diasumsikan dalam metode ini (Aune, P & Mallory, M. P., 1986). Dengan pendekatan EYM, tahanan leleh maksimum sambungan didapatkan dari metode *offset* 5% diameter (P5%). P5% merupakan titik potong antara grafik hasil pengujian dengan garis *offset* 5% diameter terukur baut. Berdasarkan ASTM D5764-97a (2002), interpretasi hasil pengujian untuk penentuan titik leleh dengan metode EYM dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Penentuan titik leleh berdasarkan metode EYM (ASTM D5764-97a, 2002).

Penentuan titik leleh berdasarkan metode EYM memiliki beberapa kekurangan dimana efek non-linier tidak dipertimbangkan dalam persamaan desain. Saat kurva melengkung (non-linier), sambungan mendapatkan gaya aksial kedua (*secondary axial forces*) dan terdapat batas beban plastis untuk transfer pembebanan ketika terjadi tahanan lateral pada sambungan atau pengencang. Nilai tahanan lateral hasil pengujian terhadap tahanan lateral sambungan seringkali lebih tinggi dibandingkan nilai persamaan desain metode EYM. Dalam penelitian ini, rumus empiris yang digunakan untuk menghitung tahanan lateral sambungan mengacu pada Eurocode 5-*Design of Timber Structures*, bukan SNI 7973:2013-*Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu*. Hal ini dikarenakan SNI 7973:2013 belum menyajikan persamaan tahanan lateral sambungan yang menggunakan pelat baja, baik untuk sambungan geser tunggal maupun sambungan geser ganda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menverifikasi perhitungan kemampuan sambungan baut menggunakan persamaan Eurocode 5 *Design of Timber Structures* pada balok FJLB sebagai komponen struktural rumah tahan gempa dari kayu. Hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian lentur baut dan sambungan yang didasarkan pada ASTM D-5764-97a dengan acuan *European Yield Model*.

## Pemodelan Sambungan

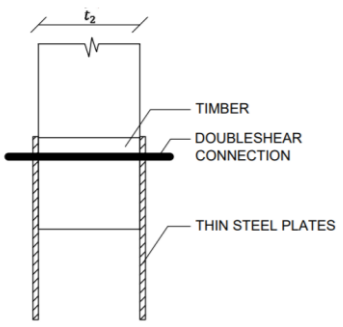
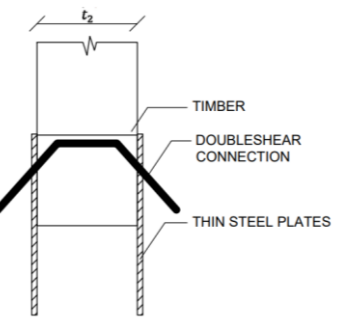
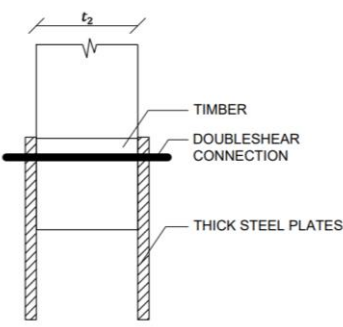
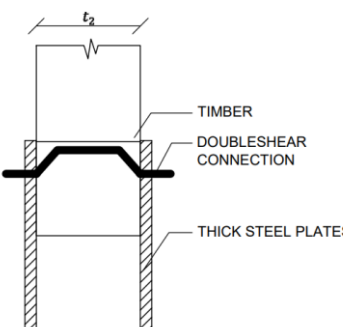
Analisa numerik saat ini banyak digunakan untuk memprediksi kekuatan dan perilaku sambungan. Meskipun demikian, teori EYM masih dapat digunakan dan memberikan nilai yang cukup dekat dengan hasil analisa numerik dan pengujian di laboratorium. Nilai yang dihasilkan dari analisa numerik dan pengujian di laboratorium biasanya lebih besar dibandingkan perhitungan teoritis (Dobes dkk, 2022; Wusqo dkk, 2019). Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya pengaruh nilai kuat cabut baut yang besarnya tidak diperhitungkan pada perhitungan sambungan menggunakan teori EYM. Analisa numerik sambungan dengan menggunakan alat sambung sekrup dan baut dapat dievaluasi menggunakan model 2D dan 3D. Dalam model 2D, konsep *beam on elastic foundation* biasanya diterapkan dalam model. Biasanya, alat sambung sekrup biasanya dimodelkan sebagai elemen balok yang ditumpu oleh beberapa elemen pegas (Wusqo dkk, 2019; Izzi dkk, 2016; Nishiyama & Ando (2003). Elemen pegas ini merepresentasikan perilaku kuat tumpu dan kuat cabut dari baut. Kuat tumpu baut dapat dimodelkan sebagai elemen yang berperilaku *elasto-plastic* maupun *rigid-plastic*. Apabila diasumsikan sebagai material yang berperilaku *elasto-plastic*, maka besarnya beban lendutan awalnya akan memiliki hubungan yang linier, diikuti dengan perilaku plastis. Sementara itu, apabila digunakan asumsi material rigid plastic, maka perilaku plastis pada material akan terjadi sejak awal pembebanan (Porteus & Kermany, 2007). Selain model 2D, perilaku sambungan dapat pula dievaluasi menggunakan pemodelan dalam 3D, semua komponen sambungan biasanya dimodelkan sebagai elemen solid (Hassanieh dkk, 2017). Elemen kayu (baik kayu gergajian maupun kayu laminasi) dimodelkan sebagai material ortotropik, dimana sifat mekanika pada ketiga sumbu berbeda.

## Steel-to-Timber Connections

Mode kegagalan sambungan geser ganda menggunakan baut dengan pelat baja pada balok FJLB mengacu pada perancangan *steel-to-timber connections* dalam Eurocode 5, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Tahanan lateral

sambungan baut ( $R_k$ ) diambil nilai terkecil dari nilai  $R_k$  mode kegagalan  $j$ ,  $k$ ,  $l$ , dan  $m$ , sesuai dengan jenis dan perletakan pelat baja yang digunakan. Pelat dikatakan tipis apabila tebal pelat kurang atau sama dengan  $0,5d$  dan dikatakan tebal apabila tebal pelat lebih besar atau sama dengan  $d$  dengan toleransi diameter lubang kurang dari  $0,1d$ . Untuk jenis pelat di antara tipis dan tebal digunakan interpolasi linier dari kedua nilai tahanan lateral sambungan. Nilai tahanan lateral sambungan diperoleh dari persamaan yang merupakan fungsi dari variabel tebal balok kayu ( $t_2$ ), diameter baut ( $d$ ), kuat tumpu pasak (*dowel embedment strength*),  $f_{h,k}$ , kuat lentur baut ( $M_{y,Rk}$ ), dan kapasitas tarik aksial baut ( $F_{ax,Rk}$ ).

Tabel 1. Tahanan Lateral Sambungan Baja-ke-Kayu (Eurocode 5).

Mode Kegagalan	Keterangan Gambar	Tahanan Lateral Sambungan Satu Baut ( $R_k$ )
$j$		$R_{k,j} = 0.5 f_{h,2,k} t_2 d$
$k$		$R_{k,k} = 1.15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}}$
$l$		$R_{k,l} = 0.5 f_{h,2,k} t_2 d$
$m$		$R_{k,m} = 2.3 \sqrt{M_{y,k} f_{h,2,k} d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}}$

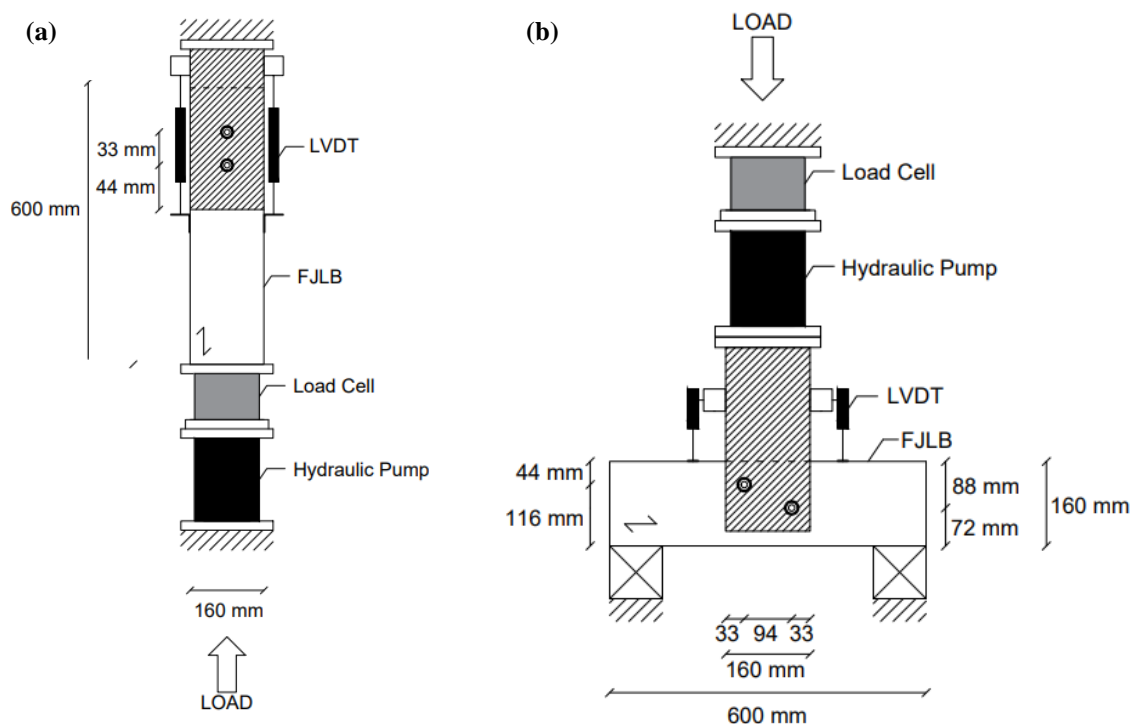
Selain variabel yang telah disebutkan, geometri sambungan baut juga memberikan pengaruh reduksi dalam perhitungan tahanan lateral sambungan. Pada penelitian ini, geometri sambungan baut dirancang dalam 2 arah, yaitu arah pembebanan sejajar serat dan tegak lurus serat. Berdasarkan Eurocode 5 Tabel 8.4, untuk diameter baut ( $d$ ) lebih besar sama dengan 5 mm, jarak minimum tepi dan spasi antar baris untuk *loaded edge* sebesar  $4d$  dan *unloaded edge* sebesar  $3d$ .

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui uji eksperimen dan analisis numerik. Pengujian sambungan baut mengikuti ASTM D-5764-97a “Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Based Products”. Uji sambungan baut geser ganda dilakukan pada FJLB kayu karet dengan pelat baja pada kedua sisi (sisi depan dan sisi belakang) balok. Pembebanan sesuai skema pengujian pada Gambar 4 diarahkan secara sejajar serat dan tegak lurus terhadap serat, dengan masing-masing pengujian sejumlah 6 benda uji sambungan. Pada pelat baja, jarak tepi, jarak pengencang dalam satu baris, dan jarak pengencang antar baris untuk sambungan baut diameter 11 mm ( $d \geq 6,35$  mm) dihitung mengikuti acuan SNI 7973:2013.

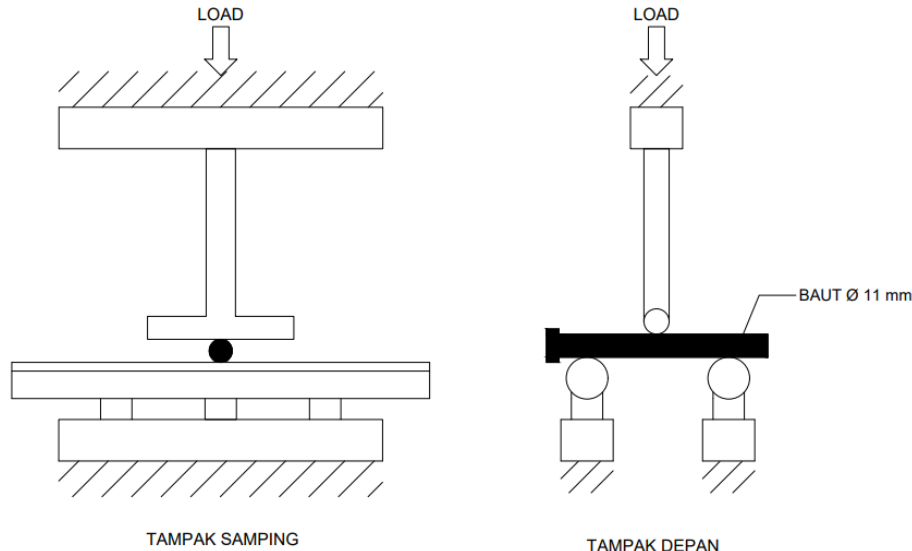
Batang yang disambung berupa FJLB dengan panjang 600 mm dan ukuran penampang 100 x 160 mm. Dimensi dalam pengujian sambungan yang ditunjukkan oleh Gambar 4 mengikuti ASTM D-5764-97a dengan ketentuan panjang sudah memenuhi persyaratan geometri Eurocode 5. Pelat baja yang digunakan berupa profil kanal tipe pelat tipis, sebanyak 2 buah pelat (*side plate*), dan tebal pelat 5,5 mm. Baut dengan diameter 11 mm digunakan sebagai alat sambung. Penempatan baut tidak diberi pengencang (mur) sehingga tidak ada gaya aksial kedua (*secondary axial force*) yang terjadi pada sambungan. Jarak antar baut pada arah pembebanan sejajar serat sebesar 33 mm dan arah pembebanan tegak lurus serat sebesar 44 mm.

Alat pengujian terdiri dari *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) dengan kapasitas 50 mm, *Hydraulic Jack*, *Hydraulic Pump*, dan *Load Cell* dengan kapasitas 100 kN. Batang FJLB disambung dengan baut seperti *set-up* pengujian pada Gambar 4. Pada tahapan awal pengujian, sambungan dikondisikan agar berada pada keadaan seimbang menggunakan alat bantu LVDT. Selanjutnya, benda uji diberi beban menggunakan *hydraulic pump*. Lama pembebanan tiap benda uji berkisar antara 10 hingga 15 menit. Data selip dan beban dari LVDT dibaca dan diolah menggunakan *data logger* secara terus menerus hingga sambungan mengalami kegagalan, dan mode kegagalan yang terjadi dapat diobservasi. Pemberian beban dihentikan ketika terjadi penurunan beban melebihi 20% beban maksimum, yang umumnya diikuti dengan retak pada FJLB.



Gambar 4. Skema pengujian sambungan baut: **a** pembebanan sejajar serat; dan **b** pembebanan tegak lurus terhadap serat.  $d = 11$  mm; tebal pelat = 5.5 mm; ketebalan FJLB = 100 mm.

Selanjutnya, nilai tahanan lateral pada sambungan baut hasil pengujian dibandingkan dengan tahanan lateral sambungan yang dihitung berdasarkan Eurocode 5. Secara numerik, tahanan lateral sambungan baut dengan pelat baja diambil dari mode kegagalan yang menghasilkan nilai  $R_k$  terkecil. Besarnya momen leleh lentur baut ( $M_{y,k}$ ) dalam persamaan  $R_k$  didapatkan dari pengujian lentur 3 titik baut seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Nilai  $M_{y,k}$  dihitung menggunakan metode 5% *offset* diameter baut.



Gambar 5. Ilustrasi uji kuat lentur baut (ASTM D-5764-97a).

Berat jenis FJLB ( $\rho_k$ ) yang digunakan adalah sebesar  $723.6 \text{ kg/m}^3$  dan diameter baut ( $d$ ) sebesar 11 mm. Perhitungan kuat tumpu pasak ( $f_{h,k}$ ) dalam analisis tahanan lateral sambungan mengikuti Persamaan 1. Dalam penentuan kuat tumpu pasak setelah diberi gaya sejajar serat ( $f_{h,\alpha,k}$ ) perlu dihitung kembali mengikuti Persamaan 2 dengan parameter koefisien jenis kayu ( $k_{90}$ ) dan sudut antara resultan gaya dan serat balok ( $\alpha$ ).

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (1)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}(\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2} \quad (2)$$

dimana koefisien untuk kayu lunak,  $k_{90} = 1,35 + 0,015d$

Momen leleh lentur baut dari hasil pengujian diperoleh sebesar 0.114 kNm dan kapasitas tarik aksial baut ( $F_{ax,Rk}$ ) menurut Eurocode 5 Subbab 8.5.2 diperoleh sebesar 27,14 kN. Pelat baja dikategorikan tipis dengan  $t_{pl}$  sebesar 5,5 mm. Tebal kayu bagian tengah sebesar 100 mm dan jumlah *shear plane* untuk *side plate* sejumlah 2. Parameter-parameter tersebut digunakan dalam perhitungan tahanan lateral sambungan sesuai Tabel 1 dengan jenis pelat tipis diambil nilai  $R_k$  mode kegagalan j dan k terkecil. Tahanan lateral sambungan ( $R_k$ ) dikalkulasi kembali menggunakan jumlah baut dalam baris ( $n$ ) dan jumlah baut efektif ( $n_{ef}$ ) untuk menentukan tahanan lateral sambungan tereduksi ( $F_{v,Rd red}$ ) sesuai Persamaan 3. Tahanan lateral sambungan tereduksi tersebut digunakan dalam verifikasi tahanan lateral sambungan terhadap tahanan lateral sambungan ketika pengujian. Parameter perhitungan analisis tahanan lateral elemen sambungan baut menggunakan pelat baja pada FJLB (*steel-to-timber connections*) dapat dilihat pada Tabel 2.

$$F_{v,Rd red} = \frac{F_{v,Rd total}}{f_i} \quad (3)$$

dengan  $f_i = \frac{n}{n_{ef}}$

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0.94} \sqrt{\frac{a}{13d}} \right\}$$

Tabel 2. Parameter Tahanan Lateral Sambungan.

PARAMETER	ARAH PEMBEBANAN			
	SEJAJAR SERAT		TEGAK LURUS SERAT	
Diameter lubang, $d$	11	mm	11	mm
Berat jenis FJLB, $\rho_{g,k}$	723.600	kg/m <sup>3</sup>	723.600	kg/m <sup>3</sup>
Kuat semat sejajar serat, $f_{h,0,k}$	52.808	N/mm <sup>2</sup>	52.808	N/mm <sup>2</sup>
Koefisien untuk kayu lunak, $k_{90}$	1.515		1.515	
Sudut antara resultan gaya dan serat balok, $\alpha$	0		90	
Kuat semat kayu untuk gaya sejajar serat, $f_{h,\alpha,k}$	52.808	N/mm <sup>2</sup>	34.857	N/mm <sup>2</sup>
Momen leleh lentur karakteristik baut, $M_{y,Rk}$	0.114	kNm	0.114	kNm
Kapasitas tarik aksial baut, $F_{ax,Rk}$	27.140	kN	27.140	kN
Tebal kayu bagian tengah, $t_2$	100	mm	100	mm
Jumlah <i>shear plane</i> dalam sambungan	2		2	
$F_{v,Rk}$	40.035	kN	35.071	kN
$F_{v,Rd total}$	25.622	kN	22.445	kN
Jumlah baut dalam baris, $n$	2		2	
Jarak antar baut dalam arah serat, $a$	33	mm	44	mm
Jumlah baut efektif, $n_{ef}$	1.293		1.390	
Faktor reduksi, $f_i$	1.546		1.439	
Tahanan lateral sambungan tereduksi, $F_{v,Rd red}$	16.569	kN	15.597	kN

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

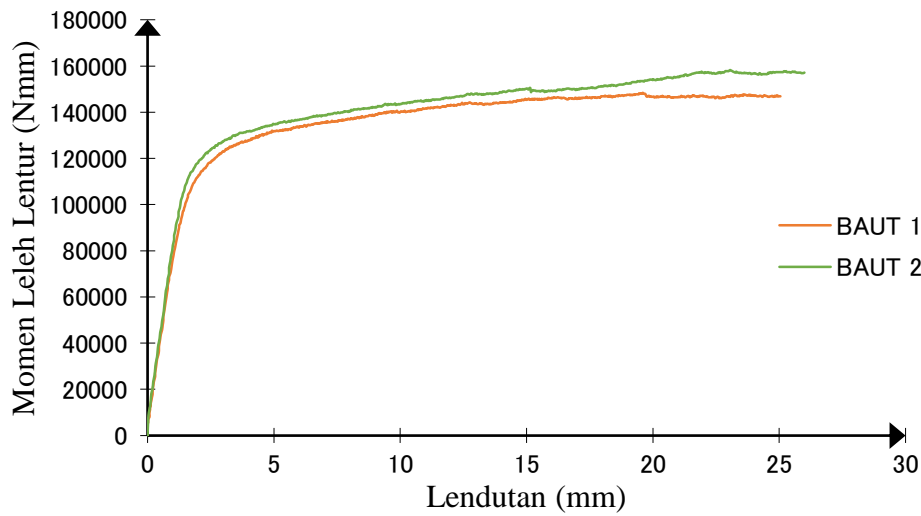
Gambar 6.a) menunjukkan proses pengujian lentur 3 titik dari baut yang digunakan sebagai alat sambung dari FJLB dan pelat besi. Pada Gambar 6.b) terlihat bahwa baut yang telah selesai diuji mengalami deformasi yang cukup besar, dan tidak bisa kembali ke bentuk semula. Gambar 7 menunjukkan hasil pengujian dari kedua baut yang diuji. Besarnya momen leleh lentur baut ( $M_{y,k}$ ) dari baut 1 adalah 0,108 kNm, sedangkan untuk baut 2 adalah 0,120 kNm. Rata rata nilai momen leleh lentur dari kedua baut adalah 0,114 kNm.



a)

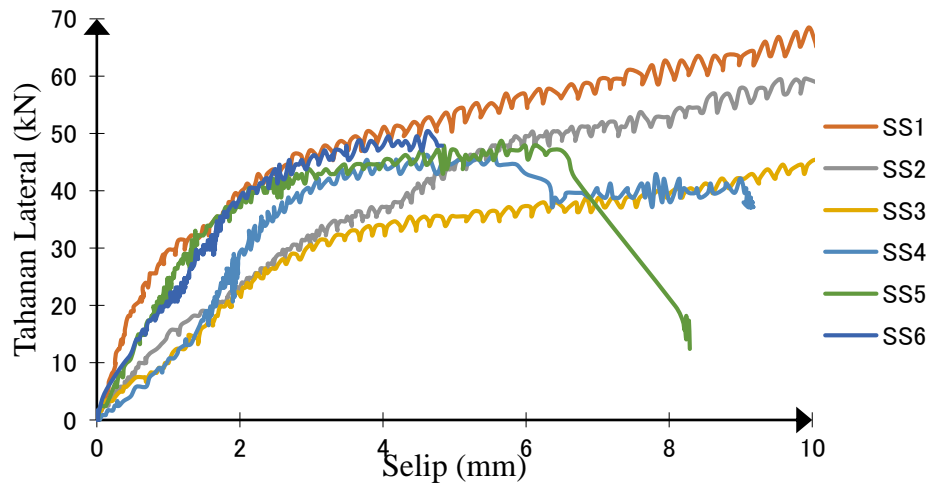
b)

Gambar 6. a) Pengujian Lentur Baut, b) Kondisi Baut Setelah Uji Lentur.



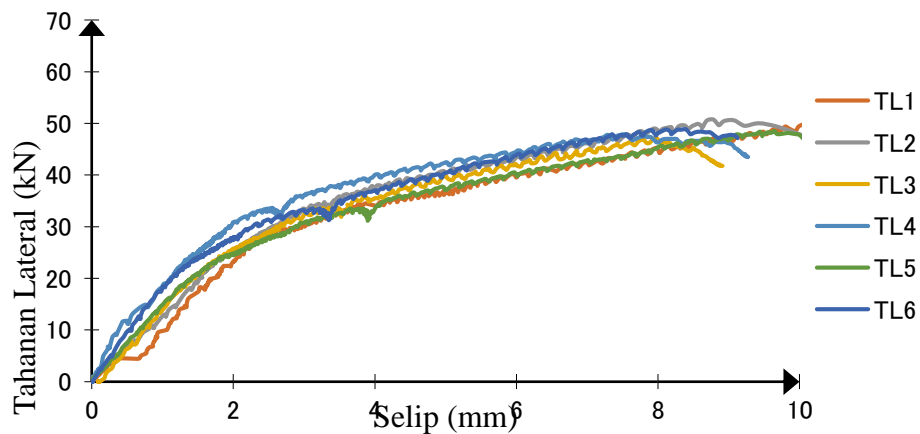
Gambar 7. Hubungan Momen Leleh Lentur - Lendutan pada Baut.

Evaluasi hubungan tahanan lateral terhadap selip pada FJLB dengan sistem sambungan baut ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara selip dengan tahanan lateral sambungan. Gambar 8 menggambarkan 6 benda uji (SS1, SS2, SS3, SS4, SS5, SS6) dengan arah pembebanan sejajar serat dan grafik, sementara Gambar 9 menggambarkan 6 benda uji (TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6) dengan arah pembebanan tegak lurus serat. Tahanan lateral sambungan hasil pengujian dapat dilihat dari pertemuan atau titik potong antara grafik hasil pengujian dengan garis *offset* 5% diameter terukur baut (0.55 mm).



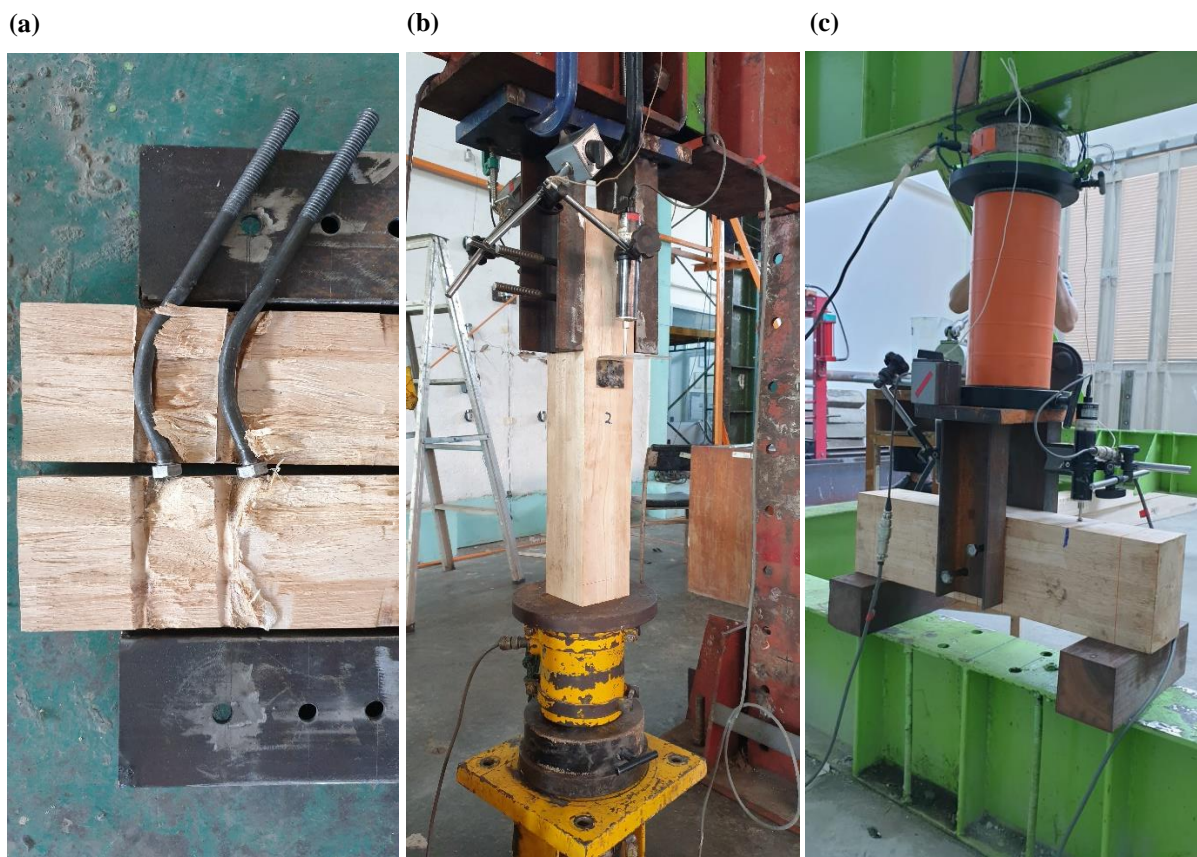
Gambar 8. Hubungan Tahanan Lateral - Selip pada Pembebanan Sejajar Serat.





Gambar 9. Hubungan Beban - Deformasi pada Pembebanan Tegak Lurus Serat.

Pengujian dilakukan dengan *set-up* yang sesuai dan diikuti dengan pembacaan data menggunakan LVDT. Pada kedua grafik di atas terdapat area linier elastik dimana sambungan baut masih bersifat daktil, area non-linier dimana sambungan mengalami kekakuan aksial (*axial stiffness*), dan area dimana baut mengalami kegagalan. Pemilihan pelat baja profil kanal C juga dimaksudkan untuk menghindari potensi kegagalan *buckling* pelat besi selama pengujian. Gambar 10 menunjukkan tipikal kegagalan sambungan baut setelah pengujian. Kegagalan sambungan baut berdasar Eurocode 5 tergolong ke dalam mode kegagalan *j* dan *k*, dilihat dari pola bentuk baut setelah pengujian dan tebal pelat yang digunakan. Sementara itu, dari perhitungan manual, nilai tahanan lateral terkecil didapatkan mode kegagalan *k*, baik itu pada sambungan yang dibebani sejajar serat maupun tegak lurus serat. Grafik hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar sambungan bersifat daktil dan dapat menahan deformasi yang cukup besar, serta memiliki tahanan lateral yang lebih besar dibanding dengan estimasi perhitungan tahanan lateral sesuai Eurocode 5 (lihat Tabel 3).



Gambar 10. Hasil Pengujian: **a** tipikal pola kegagalan sambungan; **b** *set-up* uji pembebanan tegak lurus terhadap serat; dan **c** *set-up* uji pembebanan sejajar serat.

Tabel 3. Perbandingan Tahanan Lateral Sambungan Hasil Pengujian dan Analisis Eurocode 5.

Benda Uji	Tahanan Lateral Total (kN)	Tahanan Lateral per Baut (kN)	Tahanan Lateral Sambungan Analisis (kN)	Rasio Perbandingan
SS1	29.70	14.85	16.57	0.896
SS2	35.48	17.74	16.57	1.070
SS3	32.18	16.09	16.57	0.971
SS4	42.90	21.45	16.57	1.295
SS5	41.25	20.63	16.57	1.245
SS6	42.08	21.04	16.57	1.270
<b>Rata-Rata</b>		<b>18.63</b>	<b>16.57</b>	<b>1.124</b>
TL1	32.75	16.38	15.60	1.050
TL2	33.50	16.75	15.60	1.074
TL3	30.00	15.00	15.60	0.962
TL4	32.38	16.19	15.60	1.038
TL5	26.88	13.44	15.60	0.862
TL6	27.13	13.56	15.60	0.870
<b>Rata-Rata</b>		<b>15.22</b>	<b>15.60</b>	<b>0.976</b>

Nilai tahanan lateral diperoleh dari hasil pengujian dan analisis yang dihitung mengikuti parameter pada Tabel 2. Dari Tabel 3 di atas, sebagian besar benda uji sambungan memiliki tahanan lateral yang lebih tinggi apabila dibandingkan tahanan lateral sambungan yang dihitung secara teoritis. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya pemberian faktor reduksi kekuatan dan adanya *secondary axial forces* yang terjadi dalam sambungan. Rata-rata rasio perbandingan tahanan lateral aktual dan perhitungan tahanan lateral sambungan secara teoritis memberikan nilai rasio mendekati 1.

#### 4. DISKUSI

Hasil pengujian sambungan sambungan pada Gambar 8 dan 9 memperlihatkan bahwa sambungan memiliki perilaku yang daktail. Pada saat awal proses pembebanan, hubungan antara tahanan lateral dan selip masih bersifat elastis-linier, sementara itu setelah melewati batas proporsionalnya, hubungan antara tahanan lateral dengan selip mulai bersifat non-linier. Pada benda uji SS1, SS2, dan SS3, kepala baut menempel dengan pelat baja, sehingga memberikan sedikit efek kekangan pada baut. Hal ini serupa terjadi ketika pada proses perakitan sambungan, dilakukan pengencangan pada baut. Proses pengencangan baut dapat memberikan penambahan kekuatan pada sambungan (Awaludin dkk, 2008). Karena kepala baut menempel pada pelat baja, besarnya *secondary axial force* yang dihasilkan pada benda uji SS1, SS2, dan SS3 lebih besar dibandingkan benda uji lain. Hal ini ditunjukkan oleh kurva yang didapatkan dari pengujian ketiga benda uji ini, dimana pada grafik terlihat adanya penambahan kapasitas yang cukup besar setelah ketiga benda uji ini melampaui batas proporsionalnya.

Dari Tabel 3, nilai rerata tahanan lateral per baut yang didapatkan dari pengujian untuk benda uji sejajar serat adalah 18,63 kN. Sementara itu, perhitungan menggunakan teori EYM menghasilkan nilai tahanan lateral sebesar 16,57 kN per baut. Pada umumnya, nilai tahanan lateral yang didapatkan dari pengujian sedikit lebih besar dibanding dengan hasil perhitungan menggunakan teori EYM. Hal ini wajar, karena pada teori EYM, pengaruh adanya *secondary axial force* tidak diperhitungkan. Selain itu, pada teori ini juga diberikan faktor reduksi serta faktor penyesuaian kelompok alat sambung untuk sambungan dengan lebih satu alat sambung. Meskipun demikian, nilai rasio tahanan lateral baut hasil pengujian dengan hasil perhitungan mendekati 1. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa teori EYM masih memberikan nilai tahanan lateral yang cukup handal. Awaludin & Saputro (2017) pernah melakukan penelitian serupa dengan menguji kekuatan sambungan antara *Laminated Veneer Lumber (LVL)* Kayu Sengon dengan tebal 120 mm dan pelat besi dengan tebal 5 mm menggunakan alat sambung baut dengan diameter 10 mm pada arah sejajar serat. Dari hasil pengujian, didapatkan tahanan lateral per baut sebesar 17,12 kN, sedikit lebih kecil dibanding dengan nilai tahanan lateral yang didapatkan dari pengujian ini.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya tahanan lateral sambungan, salah satunya adalah arah serat kayu saat pembebanan. Gambar 8, 9 dan Tabel 3 hasil pengujian sambungan menunjukkan bahwa tahanan lateral sambungan sejajar serat lebih tinggi dibanding dengan tegak lurus serat. Selisih antara tahanan lateral sambungan sejajar serat dengan sambungan tegak lurus serat adalah sebesar 18,30 % (hasil pengujian) dan 5,85% (hasil perhitungan menggunakan teori EYM). Selanjutnya, perilaku sambungan dapat diamati melalui grafik hubungan antara tahanan dengan selip dan pengamatan visual pola kegagalan sambungan setelah pengujian. Meskipun dalam makalah ini nilai daktilitas sambungan tidak dihitung, namun Gambar 8 dan 9 menunjukkan bahwa sambungan memiliki perilaku yang cukup daktil. Setelah leleh, nilai selip yang terjadi pada sambungan cukup besar sebelum akhirnya sambungan mengalami kegagalan. Desain bangunan tahan gempa mengarah pada peningkatan daktilitas dan redundansi (Branco & Neves, 2011). Pada bangunan dengan material berbahan dasar kayu, daktilitas disediakan oleh komponen sambungan karena kegagalan pada struktur kayu biasanya bersifat getas. Pada sambungan antara kayu dengan baja, apabila kuat tumpu kayu sudah tercapai dan alat sambung telah mengalami kelelahan, mode kegagalan yang bersifat daktil akan terjadi (Yurrita & Cabrero, 2021). Mekanisme kegagalan sambungan FJLB dengan pelat besi dapat diamati pada Gambar 10. Terlihat bahwa baut telah mengalami kelelahan, hingga terbentuk dua buah sendi plastis di sepanjang batang baut. Kondisi ini sesuai dengan mode kegagalan  $k$  yang ada pada Eurocode 5.

## 5. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, tahanan lateral dari sambungan FJLB dengan baja menggunakan alat sambung berupa baut berdiameter 11 mm dikaji. Sambungan diuji dengan menggunakan beban monotonik pada arah sejajar serat dan tegak lurus serat. Dari pengujian sambungan di laboratorium, didapatkan rata-rata nilai tahanan lateral per baut adalah sebesar 18,63 kN (sambungan sejajar serat) dan 15,22 kN (sambungan tegak lurus serat). Dari perhitungan manual berdasarkan teori EYM didapatkan tahanan lateral per baut sejajar serat sebesar 16,57 kN dengan mode kegagalan  $k$ . Sementara itu, besarnya tahanan lateral per baut tegak lurus serat berdasarkan teori EYM adalah sebesar 15,60 kN dengan mode kegagalan  $k$ . Besarnya rasio nilai tahanan lateral antara hasil pengujian dengan perhitungan manual untuk sambungan sejajar serat dan tegak lurus serat masing-masing adalah 1,124 dan 0,976. Sebagian besar sambungan yang diuji mengalami mode kegagalan  $k$ . Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aplikasi teori EYM pada sambungan FJLB dengan baja menggunakan alat sambung baut masih relevan dan memberikan hasil yang sesuai dengan hasil pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aldiansyah, I. Potret Situasi Penanganan Pascabencana Gempa Bumi Lombok Tahun 2018. Badan Penanggulangan Bencana BPBD Provinsi NTB. 2021.
- Awaludin, A., Hirai, T., Hayashikawa, T. and Sasaki, Y., 2008. *Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt*. *Journal of Wood Science*, 54(5), pp.362-368.
- Awaludin, A. and Saputro, D., 2017. *Bolt Spacing and End Distance of Bolted Connection of Laminated Veneer Lumber (LVL) Sengon*. *Civil Engineering Dimension*, 19(1).
- Awaludin, A., Hirai, T., Sasaki, Y., Toshiro, H. and Oikawa, A., 2011. *Beam to Column Timber Joints with Pretensioned Bolts*. *Civil Engineering Dimension*, 13(2).
- Branco, J. M. dan Neves, L. A. C., 2011, *Robustness of timber structures in seismic areas*, *Engineering Structures*, 33 (11), 3099-3105.
- Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, K., 2022. Rumah Instan Kayu (RIKa) dengan Teknologi Laminated Veneer Lumber. [online] Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan. Available at: <[http://sim.ciptakarya.pu.go.id/btpp/produk/teknologi-terapan/rumah-instan-kayu-\(rika\)-dengan-teknologi-laminated-veneer-lumber-2180](http://sim.ciptakarya.pu.go.id/btpp/produk/teknologi-terapan/rumah-instan-kayu-(rika)-dengan-teknologi-laminated-veneer-lumber-2180)> [Accessed 31 May 2022].
- Dobes, P., Lokaj, A., dan Mikolasek, D., 2022 *Load-Carrying Capacity of Double-Shear Bolted Connections with Slotted-In Steel Plates in Squared and Round Timber Based on the Experimental Testing, European Yield Model, and Linear Elastic Fracture Mechanics*, *Materials* 2022, 15, 2720
- Hassanieh, A., Valipour, H. R., Bradford, M. A., & Sandhaas, C. (2017). *Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study*. *Engineering Structures* 138, 35-49.
- Izzi, M., Rinaldin, G., & Fragiaco, M. (2016). *Numerical Modelling of Steel to Timber Joints and Connectors for CLT Structures*. World Conference on Timber Engineering 2016. Austria: WTCE.
- Nishiyama, N., & Ando, N. (2003). *Analysis of Load-Slip Characteristics of Nailed Wood Joints: Application of a Two-Dimensional Geometric Nonlinear Analysis*. *Journal of Wood Science* 49, 505-512.
- Wusqo, U., Ali, A., Irawati, I. S., dan Setiawan, A. F., 2019. *Study of Laminated Veneer Lumber (LVL) Sengon to Concrete Joint Using Two-Dimensional Numerical Simulation*. *Journal of The Civil Engineering Forum*, 5(3), p.275-288.
- Porteous, J. dan Kermani, A., 2007. *Structural Timber Design to Eurocode 5*, Wiley: United Kingdom.

- Awaludin, A. and Wusqo, U., 2021. Prediksi Nilai Kuat Lentur Kayu Tropis Berdasarkan Nilai Modulus Elastis. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 18(1), pp.27-42.
- Shulhan, M.A., Awaludin, A., Nugroho, M.S., Octavia, S., 2022. Kajian Perilaku Lentur Balok *Finger Joint Laminated Board* (FJLB) Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*). *Media Komunikasi Teknik Sipil*.
- Aune, P. & Mallory, M. P. (1986). *Lateral Load Bearing Capacity of Nailed Joint Based on The Yield Theory*. Madison, Wisconsin: Forest Product Laboratory, United States Department of Agriculture.
- Gečys, T., Bader, T., Olsson, A. and Kajėnas, S., 2019. *Influence of the rope effect on the slip curve of laterally loaded, nailed and screwed timber-to-timber connections*. *Construction and Building Materials*, 228, p.116702.
- Lara-Bocanegra, A., Majano-Majano, A., Crespo, J. and Guaita, M., 2017. *Finger-jointed Eucalyptus globulus with IC-PUR adhesive for high performance engineered laminated products*. *Construction and Building Materials*, 135, pp.529-537.
- Zamli, A., Hassan, R., Sidek, M., Awaludin, A., Anshari, B., Hamid, N. and Sapuan, S., 2021. Flexural Performance of Strengthened Glued Laminated (GLULAM) Timber Beam Using Glass Fibre-Reinforced Polymer (GFRP). *Green Infrastructure*, pp.75-92.
- European Standard, 2005. *EN 1993:2005 Eurocode 3: Design of Steel Structures*. Brussel: European Committee for Standardization.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013. *Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu*. SNI 7973:2013. Bandung.