

PENGARUH JENIS SEKRUP TERHADAP KEKUATAN DAN KEGAGALAN SAMBUNGAN PADA DINDING CLT AKASIA SEJAJAR

Shinta Putri Nyolinda¹, Achmad Basuki² dan Halwan Alfisa Saifullah³

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: shintapn@uns.ac.id

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: achmadbasuki@ft.uns.ac.id

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: halwan@ft.uns.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas geser dan mode keruntuhan sambungan antar dinding *Cross Laminated Timber* (CLT) kayu akasia sejajar dengan sambungan *half lap joint* dan variasi jenis sekrup (*lag screw*, *tapping screw*, dan *drilling screw*). Pengujian geser sambungan dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan dengan *lag screw* memiliki kapasitas geser tertinggi (14,57 kN) dan deformasi maksimum terbesar (13,7 mm) dibandingkan *tapping screw* dan *drilling screw*. Berdasarkan analisis mode keruntuhan, *lag screw*, *tapping screw* dan *drilling screw* mengalami mode keruntuhan III_m. Sambungan dengan *lag screw* merupakan sambungan paling efektif karena menunjukkan performa struktural terbaik

Kata kunci: *Cross Laminated Timber*, *half lap joint*, *screw*, dinding sejajar, uji geser

1. PENDAHULUAN

Cross Laminated Timber (CLT) merupakan material konstruksi modern yang semakin banyak diminati karena sifatnya yang ringan, ramah lingkungan, dan memiliki kekuatan struktural tinggi. CLT tersusun dari beberapa lapisan kayu yang disusun silang tegak lurus dan direkatkan menggunakan perekat berkekuatan tinggi, sehingga menghasilkan stabilitas dimensi yang baik serta ketahanan terhadap deformasi. Material ini telah banyak digunakan pada elemen dinding, lantai, dan atap bangunan modern, serta mendukung upaya pengurangan emisi karbon karena emisi produksinya jauh lebih rendah dibandingkan dengan beton dan baja (Saputra et al., 2024).

Dalam konteks keberlanjutan material konstruksi, kayu akasia menjadi salah satu pilihan potensial sebagai bahan dasar CLT. Kayu ini memiliki karakteristik mekanis unggul, seperti kekuatan tekan dan tarik yang baik, serta tingkat stabilitas dimensi yang tinggi. Selain itu, akasia merupakan jenis kayu cepat tumbuh yang melimpah di Indonesia, sehingga pemanfaatannya tidak hanya mendukung ekonomi lokal, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap kayu impor dan mendorong pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi nasional.

Menurut Brandner et al. (2016), kekuatan struktural dan efisiensi termal CLT sangat dipengaruhi oleh sistem sambungan yang digunakan, terutama dalam menahan beban geser dan momen lentur. Gagnon dan Pirvu (2011) menegaskan bahwa sambungan yang presisi sangat penting untuk menjamin kinerja struktural CLT, sedangkan Gagnon dan Karacabeyli (2019) menyebutkan bahwa sambungan *half-lap joint* merupakan metode yang efektif untuk menyalurkan beban geser antar elemen dinding sejajar, terutama dengan penggunaan *self-tapping screw* (STS) sebagai elemen pengikat. Hasil penelitian Smith et al. (2015) menunjukkan bahwa sambungan *half-lap joint* memberikan kekuatan dan kekakuan lentur yang lebih baik dibandingkan *spline joint*, sementara Loss dan Piazza (2015) menekankan pentingnya jarak antar sambungan dan jarak tepi panel untuk mencegah kerusakan lokal seperti retak atau lepas serat kayu.

Selain itu, Haris (2015) menyatakan bahwa variasi densitas dan orientasi serat kayu memengaruhi kapasitas tumpu sambungan. Penelitian-penelitian terdahulu seperti Flatscher et al. (2014), Gavric et al. (2015), Hossain et al. (2018), dan Shahnewaz et al. (2018) juga menunjukkan bahwa konfigurasi dan sudut pemasangan sekrup memengaruhi kekakuan, keuletan, serta kapasitas geser sambungan CLT. Sementara itu, Tomasi et al. (2006) menegaskan bahwa tiap jenis sekrup memiliki perilaku mekanis yang berbeda — *lag screw* unggul dalam menahan beban besar, *tapping screw* efisien untuk sambungan geser ringan, dan *drilling screw* cocok untuk kayu berdensitas tinggi.

Berdasarkan temuan-temuan tersebut, masih terdapat keterbatasan informasi mengenai pengaruh jenis sekrup terhadap sambungan antar dinding CLT yang sejajar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji efektivitas penggunaan *lag screw*, *tapping screw*, dan *drilling screw* pada sambungan *half-lap joint* berbahan kayu akasia.

Melalui pengujian kapasitas geser, pola kegagalan, dan efisiensi sambungan, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi perancangan sambungan CLT yang lebih efektif, andal, dan berkelanjutan dalam konstruksi berbasis kayu di Indonesia.

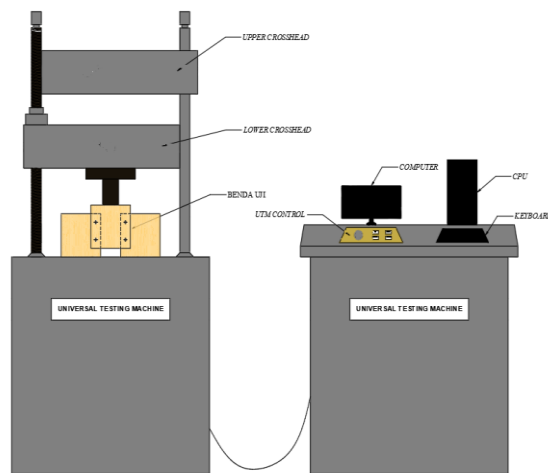
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yang bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas sambungan *Cross Laminated Timber* (CLT) berbahan dasar kayu akasia menggunakan tiga variasi sekrup yaitu *lag screw*, *tapping screw*, dan *drilling screw*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Kayu, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

Benda uji yang digunakan berupa tiga balok CLT akasia dengan dimensi masing-masing 20 cm x 20 cm yang disusun secara sejajar menggunakan sambungan *half lap joint*. Setiap sambungan diperkuat dengan empat buah sekrup yang bervariasi jenisnya sesuai dengan fokus pengujian. Pengujian geser pada sekrup dan sambungan dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan cara meletakkan benda uji pada alat UTM kemudian akan diberikan beban secara bertahap hingga terjadinya kegagalan. Pengujian tersebut berfungsi untuk memperoleh data mengenai kapasitas geser maksimum serta nilai deformasi maksimum yang terjadi selama proses pengujian. Gambar.1 berikut menunjukkan *setting up* pengujian sambungan CLT akasia dan Tabel.1 merupakan benda uji yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel.1 Benda Uji

Jenis Sambungan	Jumlah Balok Kayu	Jumlah Sampel	Ukuran Balok Kayu	Jumlah Sekrup	Diameter Sekrup
Sambungan <i>Lag Screw</i>	3 buah	3 buah	20 cm x 20 cm	4 buah	0,5 cm
Sambungan <i>Tapping Screw</i>	3 buah	3 buah	20 cm x 20 cm	4 buah	0,5 cm
Sambungan <i>Drilling Screw</i>	3 buah	3 buah	20 cm x 20 cm	4 buah	0,5 cm



Gambar.1 *Setting Up* Pengujian Sambungan CLT Akasia

Setelah tahap pengujian selesai, dilakukan analisis terperinci terhadap pola kegagalan yang muncul pada masing-masing sambungan. Analisis ini mencakup evaluasi visual terhadap kondisi sambungan setelah pengujian serta pengolahan data kuantitatif untuk menentukan kapasitas beban dan deformasi maksimum. Hasil analisis kemudian dibandingkan antar jenis sekrup untuk mengidentifikasi sambungan mana yang memberikan performa struktural paling optimal. Hasil akhir dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan referensi yang berguna dalam pemilihan dan desain sambungan CLT yang efektif dan efisien dalam aplikasi konstruksi.

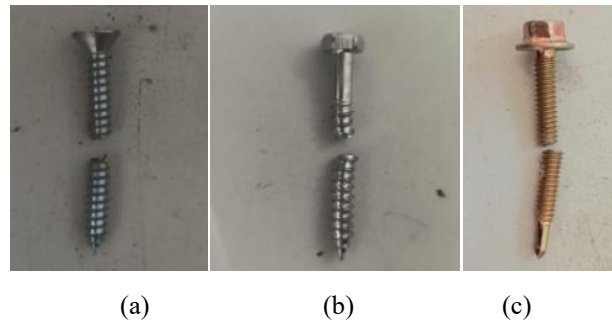
3. HASIL & PEMBAHASAN

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas geser sekrup dan sambungan *Cross Laminated Timber* (CLT) Akasia pada masing-masing jenis sekrup. Dalam pengujian ini, berbagai parameter seperti kapasitas geser maksimum,

deformasi, dan mode kegagalan akan diamati guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik sambungan.

Pengujian Kapasitas Geser Sekrup

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja mekanis sekrup dalam menerima gaya geser secara individu. Proses pengujian dilakukan dengan cara memasang sekrup pada plat, kemudian memasang plat bagian atas dan plat bagian bawah ke alat pemegang benda uji UTM. Setelah itu, beban tarik diberikan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM), sehingga menghasilkan gaya geser pada sekrup. Gambar.2 menunjukkan hasil pengujian kapasitas geser sekrup.



Gambar. 2 (a) Hasil Pengujian *Tapping Screw* (b) Hasil Pengujian *Lag Screw* (c) Hasil Pengujian *Drilling Screw*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas geser tertinggi diperoleh pada jenis sekrup *tapping screw* sebesar 17,6 kN, diikuti oleh *lag screw* sebesar 13,31 kN dan yang terendah pada *drilling screw* sebesar 10,45 kN. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik dan jenis sekrup memengaruhi ketahanan terhadap gaya geser. Tabel. 2 menunjukkan hasil pengujian kapasitas geser sekrup.

Tabel.2 Hasil Pengujian Kapasitas Geser Sekrup

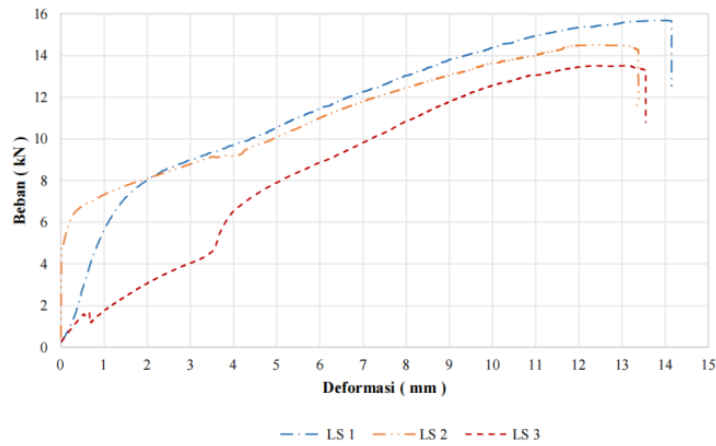
Jenis Sekrup	Kapasitas Geser Sekrup (kN)	Deformasi Maksimum (mm)
<i>Tapping Screw</i>	17,6	8,6
<i>Lag Screw</i>	13,3	4,1
<i>Drilling Screw</i>	10,5	4,4

Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Lag Screw*

Berdasarkan hasil pengujian, beban maksimum tertinggi terjadi pada benda uji *lag screw* 1 sebesar 15,68 kN dengan deformasi mencapai 14,15 mm. Berdasarkan data dari ke-3 pengujian, didapatkan kapasitas maksimum rata-rata yaitu 14,57 kN dan deformasi maksimum rata-rata sebesar 13,7 mm. Tabel. 3 menunjukkan hasil pengujian dinding sejajar CLT akasia sambungan *lag screw*.

Tabel. 3 Hasil Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Lag Screw*

Benda Uji	Kapasitas Maksimum (kN)	Deformasi Maksimum (mm)
<i>Lag Screw 1</i>	15,68	14,15
<i>Lag Screw 2</i>	14,51	13,39
<i>Lag Screw 3</i>	13,51	13,55
Rata -Rata	14,57	13,7



Gambar. 3 Gambar Hubungan Beban dan Deformasi Sambungan *Lag Screw*

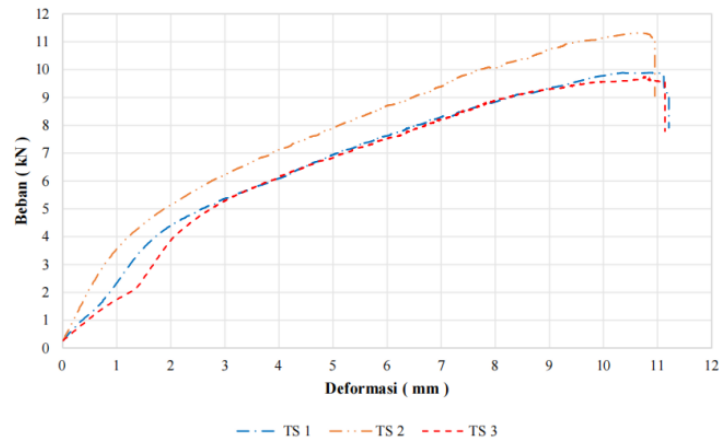
Gambar. 3 menunjukkan hubungan antara beban dan deformasi pada sambungan *Cross Laminated Timber* (CLT) Akasia yang menggunakan *lag screw*. Berdasarkan gambar tersebut, kapasitas tertinggi ditunjukkan oleh *lag screw 1* dengan beban maksimum sebesar 15,68 kN pada deformasi 14,15 mm, diikuti oleh *lag screw 2* dengan kapasitas 14,51 kN dan deformasi 13,39 mm. Sementara itu, *lag screw 3* memiliki kapasitas terendah yaitu 13,51 kN pada deformasi 13,55 mm. Pada *lag screw 3*, kurva menunjukkan kenaikan beban secara progresif hingga mencapai puncak sebelum mengalami fluktuasi beban di tahap awal pengujian. Pada awal kurva (0–1 mm), terlihat adanya fluktuasi beban yang tidak linear, berupa naik turun yang tidak teratur. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi awal sambungan yang belum stabil, seperti adanya celah antar balok CLT, slip antar elemen sambungan, atau penyesuaian awal saat gaya mulai diterapkan. Faktor lain yang mungkin berperan adalah gesekan antara screw dengan kayu. Setelah sambungan mulai bekerja optimal, kurva menunjukkan kenaikan beban yang stabil hingga mencapai puncaknya, lalu menurun tajam akibat kegagalan sambungan. Pola ini mengindikasikan bahwa sambungan memiliki kemampuan deformasi yang baik hingga beban maksimum tercapai.

Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Tapping Screw*

Berdasarkan hasil pengujian, beban maksimum tertinggi terjadi pada benda uji *tapping screw 2* sebesar 11,31 kN dengan deformasi mencapai 10,95 mm. Berdasarkan data dari ke-3 pengujian, didapatkan kapasitas maksimum rata-rata yaitu 10,31 kN dan deformasi maksimum rata-rata sebesar 11,1 mm. Tabel. 4 menunjukkan hasil pengujian dinding sejajar CLT akasia sambungan *tapping screw*.

Tabel. 4 Hasil Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Tapping Screw*

Benda Uji	Kapasitas Maksimum (kN)	Deformasi Maksimum (mm)
<i>Tapping Screw 1</i>	9,89	11,21
<i>Tapping Screw 2</i>	11,31	10,95
<i>Tapping Screw 3</i>	9,73	11,14
Rata -rata	10,31	11,1



Gambar. 4 Gambar Hubungan Beban dan Deformasi Sambungan *Tapping Screw*

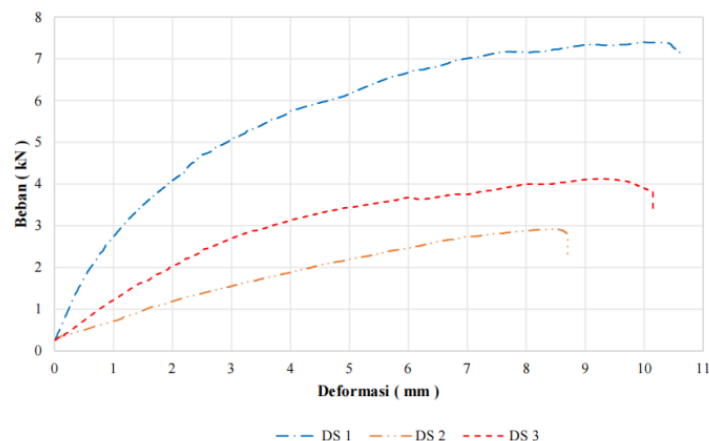
Gambar. 4 menunjukkan hubungan antara beban dan deformasi dari pengujian kapasitas geser sambungan antar panel CLT menggunakan tiga sampel *tapping screw* (TS 1, TS 2, dan TS 3). Hasil pengujian menunjukkan bahwa TS 2 memiliki kapasitas tertinggi sebesar 11,31 kN pada deformasi 10,95 mm, diikuti oleh TS 1 dengan kapasitas 9,89 kN pada deformasi 11,21 mm, dan TS 3 sebesar 9,73 kN pada deformasi 11,14 mm. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun pengujian dilakukan dengan spesifikasi teknis yang seragam, karakteristik material dan faktor pelaksanaan tetap berperan besar dalam memengaruhi performa sambungan.

Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Drilling Screw*

Berdasarkan hasil pengujian, beban maksimum tertinggi terjadi pada benda uji *drilling screw* 1 sebesar 7,4 kN dengan deformasi mencapai 10,6 mm. Berdasarkan data dari ke-3 pengujian, didapatkan kapasitas maksimum rata-rata yaitu 4,82 kN dan deformasi maksimum rata-rata sebesar 9,82 mm. Tabel. 5 menunjukkan hasil pengujian dinding sejajar CLT akasia sambungan *drilling screw*.

Tabel. 5 Hasil Pengujian Dinding Sejajar CLT Akasia Sambungan *Drilling Screw*

Benda Uji	Kapasitas Maksimum (kN)	Deformasi Maksimum (mm)
<i>Drilling Screw 1</i>	7,40	10,6
<i>Drilling Screw 2</i>	2,92	8,71
<i>Drilling Screw 3</i>	4,13	10,15
Rata - Rata	4,82	9,82



Gambar. 5 Gambar Hubungan Beban dan Deformasi Sambungan *Drilling Screw*

Gambar. 5 menunjukkan hubungan antara beban dan deformasi pada sambungan *Cross Laminated Timber* (CLT) Akasia yang menggunakan *drilling screw*. Gambar tersebut menunjukkan variasi performa yang cukup signifikan antar ketiga sampel. Sampel dengan kapasitas tertinggi ditunjukkan oleh *Drilling Screw 1* dengan beban maksimum sebesar 7,40 kN pada deformasi 10,6 mm. Sementara itu, *Drilling Screw 3* hanya mampu menahan beban hingga 4,13 kN dan *Drilling Screw 2* menunjukkan performa paling rendah dengan kapasitas maksimum 2,92 kN pada deformasi 8,71 mm. Perbedaan yang cukup jauh ini kemungkinan besar disebabkan oleh beberapa faktor, seperti ketidakraturan pada pemasangan sekrup, variasi kedalaman penanaman atau sudut pemasangan, serta kualitas material kayu pada tiap spesimen. Selain itu, kemungkinan adanya cacat lokal pada kayu, seperti retakan atau kepadatan yang tidak merata, juga dapat memengaruhi kinerja sambungan. Hal ini menunjukkan bahwa jenis sekrup dan konsistensi dalam metode pemasangan memiliki pengaruh besar terhadap kapasitas sambungan yang dihasilkan. Variasi ini menjadi penting untuk diperhatikan dalam penerapan sambungan CLT di lapangan agar hasilnya konsisten dan sesuai perencanaan.

Analisis Kapasitas Geser Sambungan CLT

Perhitungan nilai desain tahanan lateral acuan (Z) dan nilai tahanan acuan sambungan terkoreksi (Z') dilakukan berdasarkan SNI 7973-2013, dengan mempertimbangkan parameter seperti diameter sekrup, panjang tumpu, serta kuat tumpu kayu. Semua parameter tersebut diperoleh langsung dari spesimen dalam penelitian ini, kecuali parameter berat jenis kayu dan kadar air yang merujuk pada data dari penelitian sebelumnya oleh Saharso (2024). Penggunaan data tersebut dipilih karena karakteristik jenis kayu dalam penelitian tersebut serupa dengan kayu yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga diharapkan menghasilkan perhitungan kapasitas estimasi yang lebih akurat. Contoh perhitungan lengkap untuk salah satu jenis sekrup (*lag screw*) ditunjukkan pada bagian berikut ini:

➤ Perhitungan kuat tumpu pasak kayu utama (F_{em})

Karena $D < 6,35$ maka memakai rumus:

$$F_{em} = 100 \times G_1^{1,84} = 100 \times 0,65^{1,84} = 45,27 \text{ MPa}$$

➤ Perhitungan kuat tumpu pasak kayu samping (F_{es})

Karena $D < 6,35$ maka memakai rumus:

$$F_{es} = 100 \times G_2^{1,84} = 100 \times 0,65^{1,84} = 45,27 \text{ MPa}$$

➤ Perhitungan rasio kuat tumpu (R_e)

$$R_e = \frac{F_{em}}{F_{es}} = \frac{45,27}{45,27} = 1$$

➤ Perhitungan rasio panjang tumpu (R_t)

$$R_t = \frac{l_m}{l_s} = \frac{25,5}{25,5} = 1$$

➤ Nilai kuat geser sekrup (F_{vb})

$$\begin{aligned} F_{vb} &= \frac{\text{kapasitas geser sekrup}}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} \\ &= \frac{13,31}{0,25 \cdot 3,14 \cdot 5^2} \\ &= 678,08 \text{ MPa} \end{aligned}$$

➤ Perhitungan nilai syarat reduksi (R_d)

Karena $D < 6,35$ mm, maka dipakai rumus K_D^1

$$K_D = 0,4D + 0,5 = 0,4 \times 5 + 0,5 = 2,5$$

➤ Perhitungan konstanta (k) berdasarkan

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\sqrt{R_e + 2R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 R_e^3 - R_e(1 + R_t)}}{(1 + R_e)} \\ &= \frac{\sqrt{1 + 2 \times 1(1 + 1 + 1^2) + 1^2 \times 1^3 - 1(1 + 1)}}{(1 + 1)} \\ &= \frac{\sqrt{8} - 2}{2} \\ &= 0,41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_2 &= -1 + \sqrt{2(1 + R_e) + \frac{2F_{vb}(1 + 2R_e)D^2}{3F_{em}l_m^2}} \\ &= -1 + \sqrt{2(1 + 1) + \frac{2 \times 678,08 (1 + 2 \times 1) 5^2}{3 \times 45,27 \times 25,5^2}} \\ &= -1 + \sqrt{5,15} \\ &= 1,27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_3 &= -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{vb}(2 + R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}} \\ &= -1 + \sqrt{\frac{2(1 + 1)}{1} + \frac{2 \times 678,08 (2 + 1) 5^2}{3 \times 45,27 \times 25,5^2}} \\ &= -1 + \sqrt{5,15} \\ &= 1,27 \end{aligned}$$

➤ Perhitungan nilai tahanan lateral acuan (Z)

Karena penelitian ini termasuk penelitian geser tunggal, maka hanya memakai rumus geser tunggal saja.

Untuk mode kelelahan I_m perhitungannya sebagai berikut :

$$Z = \frac{D I_m F_{em}}{R_d} = \frac{5 \times 25,5 \times 45,27}{2,5} = 2309 \text{ N}$$

Untuk mode kelelahan I_s perhitungannya sebagai berikut :

$$Z = \frac{D I_s F_{es}}{R_d} = \frac{5 \times 25,5 \times 45,27}{2,5} = 2309 \text{ N}$$

Untuk mode kelelahan II perhitungannya sebagai berikut :

$$Z = \frac{k_1 D I_s F_{es}}{R_d} = \frac{0,41 \times 5 \times 25,5 \times 45,27}{2,5} = 956 \text{ N}$$

Untuk mode kelelahan III_m perhitungannya sebagai berikut :

$$Z = \frac{k_2 D I_s F_{em}}{(1 + 2R_e)R_d} = \frac{1,27 \times 5 \times 25,5 \times 45,27}{(1 + 2 \times 1) 2,5} = 977 \text{ N}$$

Untuk mode kelelahan III_s perhitungannya sebagai berikut :

$$Z = \frac{k_3 D I_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d} = \frac{1,27 \times 5 \times 25,5 \times 45,27}{(2 + 1) 2,5} = 977 \text{ N}$$

Untuk mode kelelahan IV perhitungannya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z &= \frac{D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2F_{em} F_{vb}}{3(1 + R_e)}} \\ &= \frac{5^2}{2,5} \sqrt{\frac{2 \times 45,27 \times 678,08}{3(1 + 1)}} \\ &= 1011 \text{ N} \end{aligned}$$

Menurut SNI 7973-2013, diambil nilai tahanan lateral acuan terkecil. Berdasarkan analisis diatas, didapat nilai terkecil yaitu 956 N pada mode kelelahan II.

➤ Perhitungan nilai tahanan acuan terkoreksi (Z')

Nilai desain acuan sambungan terkoreksi dihitung untuk mengetahui kapasitas estimasi yang terjadi pada sambungan dengan memperhitungkan faktor-faktor. Faktor tersebut yaitu faktor layan basah, faktor temperatur, faktor aksi kelompok, faktor geometri, faktor serat ujung, faktor diafragma, faktor ujung paku, faktor konversi format, faktor tahanan sambungan, dan faktor efek waktu.

$$Z' = Z \times C_M \times C_t \times C_g \times C_\Delta \times C_{eg} \times C_{di} \times C_{tn} \times K_F \times \phi \times \lambda$$

$$Z' = 956 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,67 \times 1,1 \times 0,83 \times 3,32 \times 0,65 \times 0,8$$

$$Z' = 1010 \text{ N}$$

Untuk mencari tahanan lateral acuan sambungan, maka nilai tahanan lateral acuan terkecil dikalikan dengan jumlah sekrup yang digunakan.

$$\begin{aligned} Z_{\text{sambungan}} &= n \times Z \\ &= 4 \times 1010 \\ &= 4039 \text{ N} \\ &= 4,04 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan rata-rata kapasitas geser sambungan *lag screw* sebesar 14,57 kN. Rasio perbandingan antara kapasitas eksperimental dan kapasitas estimasi sambungan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\text{Kapasitas Eksperimental}}{\text{Kapasitas Estimasi}} = \frac{14,57}{4,04} = 3,61$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sambungan memiliki performa aktual yang jauh lebih baik dari perkiraan, yang dapat menjadi pertimbangan untuk optimasi desain di masa mendatang.

Untuk menilai performa aktual sekrup dalam konteks sambungan CLT sejajar, dilakukan pendekatan kuantitatif melalui perhitungan efektivitas sambungan. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan kapasitas geser sekrup jenis *lag screw* sebesar 13,31 kN.

$$\begin{aligned} \text{Efektivitas} &= \frac{\text{Kapasitas Geser Sambungan}}{\text{Kapasitas Geser Sekrup}} \\ &= \frac{14,57}{13,31} \\ &= 1,09 \end{aligned}$$

Hasil menunjukkan bahwa *lag screw* memiliki efektivitas sebesar 1,09, yang menunjukkan bahwa jenis sekrup ini mampu memanfaatkan kekuatannya secara optimal dalam sambungan. Pada Tabel. 6 menunjukkan rekapitulasi analisis pengujian geser sambungan CLT.

Tabel. 6 Rekapitulasi Analisis Pengujian Geser Sambungan CLT

Jenis Sekrup	Kapasitas Estimasi (kN)	Mode Keruntuhan Estimasi	Rasio	Efektivitas Sambungan
<i>Lag Screw</i>	4,04	II	3,61	1,09
<i>Tapping Screw</i>	4,04	II	2,55	0,59
<i>Drilling Screw</i>	3,79	IV	1,27	0,46

Berdasarkan Tabel 4.5, diketahui bahwa nilai kapasitas estimasi dan mode keruntuhan estimasi untuk *lag screw* dan *tapping screw* menunjukkan hasil yang sama yaitu sebesar 4,04 kN dengan mode keruntuhan II. Sedangkan, untuk *drilling screw* menghasilkan kapasitas estimasi terendah sebesar 3,79 kN dan tergolong dalam mode keruntuhan IV. Pada analisis rasio, *lag screw* mencatatkan nilai tertinggi sebesar 3,61, yang mengindikasikan bahwa kapasitas sambungan hasil pengujian mampu mencapai hampir empat kali lipat dari nilai estimasi awalnya. Sementara itu, pada analisis efektivitas sambungan, *lag screw* kembali menunjukkan performa terbaik dengan nilai sebesar 1,09. Nilai ini menunjukkan bahwa *lag screw* mampu menyalurkan lebih dari 100% kapasitas kekuatannya ke dalam sambungan, menjadikannya jenis sekrup yang paling efektif untuk digunakan sebagai pengikat sambungan dinding CLT dari kayu akasia yang tersusun sejajar.

Mode Keruntuhan Sambungan

Analisis terhadap mode keruntuhan sambungan dilakukan untuk mengidentifikasi jenis kegagalan yang terjadi pada masing-masing tipe sekrup. Analisis ini penting untuk memahami mekanisme kerusakan pada sambungan CLT ketika menerima beban geser secara maksimum. Penentuan mode keruntuhan didasarkan pada hasil pengamatan bentuk kerusakan yang tampak pada sambungan setelah pengujian, serta mengacu pada klasifikasi keruntuhan sambungan kayu sesuai SNI 7973-2013. Mode keruntuhan yang terjadi pada 3 jenis sambungan sekrup yang berbeda dapat dilihat pada Gambar. 6, Gambar. 7 dan Gambar. 8.



Gambar. 6 Mode Keruntuhan *Lag Screw 1*



Gambar. 7 Mode Keruntuhan *Tapping Screw 2*

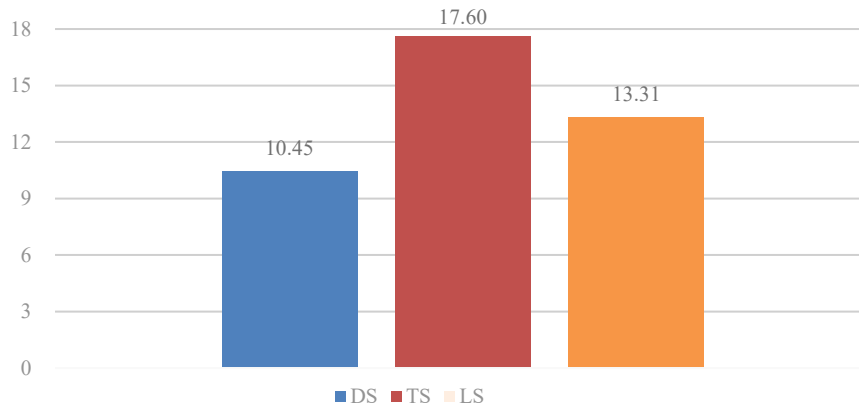


Gambar. 8 Mode Keruntuhan *Drilling Screw 1*

Berdasarkan Gambar. 6, Gambar. 7, dan Gambar. 8, dapat disimpulkan bahwa ke-tiga jenis sambungan sekrup mempunyai kesamaan pola kegagalan. Dapat diketahui bahwa sekrup mengalami pembengkokan diarea bidang geser pada komponen struktur utama. Mengacu pada SNI 7973:2013, jenis kegagalan ini diklasifikasikan sebagai Mode III_m, yaitu leleh pada alat sambung akibat lentur di satu titik sendi plastis per bidang geser, dan leleh didominasi tumpu pada serat kayu yang kontak dengan alat sambung pada komponen struktur utama.

Perbandingan Kinerja Antar Sekrup

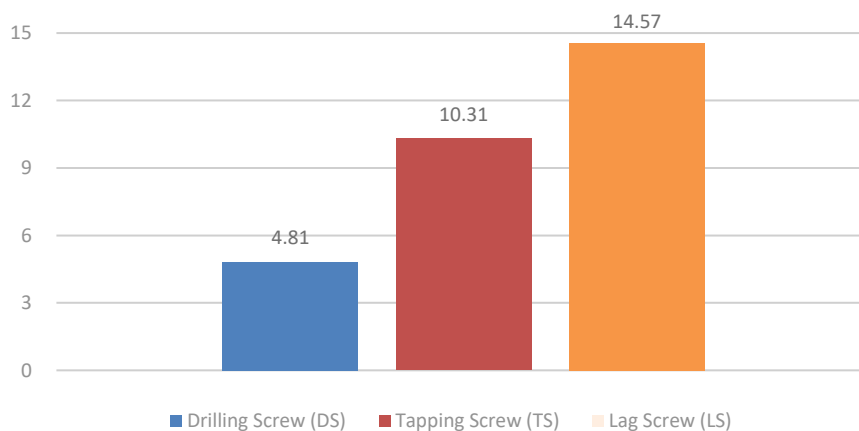
Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui jenis sekrup mana yang memiliki performa paling optimal dalam menahan beban geser serta menunjukkan tingkat deformasi terkecil. Pada Gambar. 9 menunjukkan perbandingan kapasitas geser sekrup antar jenis sekrup.



Gambar. 9 Perbandingan Kapasitas Geser Sekrup

Berdasarkan Gambar. 9, kapasitas geser sekrup tertinggi diperoleh pada jenis sekrup *tapping screw* sebesar 17,60 kN, disusul oleh *lag screw* dengan nilai 13,31 kN, dan nilai terendah pada *drilling screw* sebesar 10,45 kN. Hal ini menunjukkan bahwa secara material dan bentuk ulir, *tapping screw* memiliki ketahanan tertinggi terhadap gaya geser langsung. Namun demikian, jika dibandingkan dengan hasil uji sambungan CLT pada pembahasan sebelumnya, posisi *tapping screw* justru tidak memberikan kekuatan sambungan tertinggi. Sebaliknya, *lag screw* meskipun secara individu tidak memiliki kapasitas geser tertinggi, namun tetap mampu memberikan performa sambungan yang paling kuat dan efisien. Temuan ini menunjukkan bahwa kekuatan geser sekrup secara individu tidak selalu berbanding lurus dengan efektivitasnya dalam sambungan, karena sambungan melibatkan interaksi kompleks antara ulir sekrup, kedalaman penetrasi, jenis kepala sekrup, dan karakteristik material kayu.

Perbandingan kapasitas geser sambungan dilakukan untuk melihat perbedaan kapasitas beban maksimum yang dapat ditahan oleh masing-masing jenis sambungan. Melalui perbandingan ini, dapat dilihat seberapa besar pengaruh jenis sekrup terhadap kekuatan dan kekakuan sambungan pada dinding CLT yang disusun sejajar. Selain itu, hasil ini juga dapat dijadikan acuan dalam pemilihan jenis sambungan mekanis yang paling efektif secara struktural. Pada Gambar. 10 dapat dilihat perbandingan kapasitas geser sambungan antar jenis sekrup.



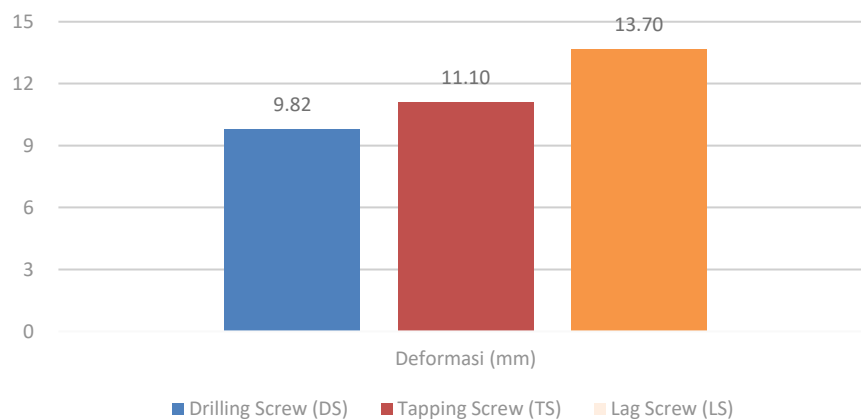
Gambar. 10 Perbandingan Kapasitas Geser Sambungan

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar. 10, sambungan yang menggunakan *lag screw* memiliki kapasitas geser tertinggi sebesar 14,57 kN, diikuti oleh *tapping screw* dengan kapasitas 10,31 kN, dan *drilling screw* sebesar

4,82 kN. Ketiga jenis sekrup yang digunakan memiliki diameter yang sama, namun demikian, hasil pengujian eksperimental terhadap kapasitas geser sambungan menunjukkan adanya perbedaan nilai antar jenis sekrup.

Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik ulir yang berbeda pada masing-masing jenis sekrup. *Drilling screw* (DS) memiliki ulir halus dan rapat sehingga memberikan kontak yang lebih luas antara sekrup dan kayu, meningkatkan tahanan lateral. *Tapping screw* (TS) memiliki ulir sedang yang memberikan keseimbangan antara kekakuan dan deformasi. *Lag screw* (LS) memiliki ulir kasar dan jarang, yang menghasilkan mekanisme pengait yang kuat tetapi dapat menyebabkan konsentrasi tegangan lebih tinggi. Perbedaan karakteristik ini berpengaruh terhadap interaksi mekanis antara sekrup dan elemen kayu, yang kemudian tercermin pada kapasitas geser sambungan yang berbeda. Oleh karena itu, analisis kapasitas sambungan harus mempertimbangkan jenis ulir serta perilaku deformasi dan kerusakan selama pengujian.

Perbandingan deformasi maksimum bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pergeseran yang terjadi pada masing-masing jenis sambungan saat menerima beban puncak. Nilai deformasi ini diambil dari hasil pengujian terhadap tiga benda uji dan dihitung nilai rata-ratanya. Gambar. 11 berikut menyajikan perbandingan deformasi maksimum dari ketiga jenis sambungan.



Gambar. 11 Perbandingan Deformasi Maksimum Sambungan

Berdasarkan gambar. 11, sambungan dengan lag screw (ls) menunjukkan deformasi maksimum tertinggi sebesar 13,70 mm. Nilai ini menunjukkan bahwa sambungan dengan lag screw tidak hanya memiliki kapasitas beban geser tertinggi, tetapi juga mampu mengalami deformasi lebih besar sebelum mengalami keruntuhan, yang menandakan sifat sambungan yang lebih duktil. Sambungan dengan tapping screw (ts) berada di posisi tengah dengan deformasi maksimum sebesar 11,10 mm, sedangkan drilling screw (ds) memiliki deformasi terkecil sebesar 9,82 mm, menunjukkan sifat sambungan yang lebih kaku namun memiliki karakteristik keruntuhan getas (*brittle failure*) yang ditandai dengan deformasi kecil sebelum kegagalan. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa sambungan dengan lag screw memiliki performa paling baik secara keseluruhan, karena mampu menahan beban tertinggi dan tetap mempertahankan deformasi yang cukup besar, memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang optimal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa sambungan menggunakan *lag screw* memiliki kapasitas geser tertinggi, yaitu sebesar 14,57 kN, dibandingkan dengan sambungan *tapping screw* sebesar 10,31 kN, dan *drilling screw* sebesar 4,82 kN. Berdasarkan pengamatan visual, ke-3 jenis sekrup mempunyai mode keruntuhan yang sama yaitu mode III_m. Kombinasi kapasitas geser, kemampuan deformasi, rasio dan keefektifitasan sambungan menegaskan bahwa *lag screw* merupakan pilihan sambungan yang paling efektif untuk dinding CLT sejajar, dengan performa struktural paling baik secara keseluruhan. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pemilihan jenis sekrup mempengaruhi kapasitas kekuatan sambungan namun tidak berpengaruh pada mode keruntuhan.

Sebagai rekomendasi untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk melakukan pembebanan siklik pada sambungan untuk mengevaluasi efektivitas sambungan dalam menahan gaya gempa yang bersifat berulang. Selain itu, penelitian selanjutnya juga dapat mempertimbangkan penggunaan sambungan spline untuk menentukan jenis sambungan yang paling efektif dalam menahan gaya geser antar elemen CLT

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret yang telah memberikan dukungan fasilitas laboratorium sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Achmad Basuki, S.T., M.T., Dr. Eng. Ir. Halwan Alfisa Saifullah, S.T., M.T., dan Ibu Kundari Rahmawati, S.Pd., M.Eng., atas bimbingan, arahan, serta bantuan teknis selama proses penelitian berlangsung. Tidak lupa saya mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan dan teman-teman yang selalu memberikan dukungan moral serta semangat hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan penggunaan kayu sebagai bahan konstruksi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., Thiel, A. (2016). *Cross laminated timber (CLT): overview and development*. Eur. J. Wood Prod. 74, 331–351.
- Flatscher, G., Bratulić, K., Schickhofer, G. (2014). Screwed Joints in Cross Laminated Timber Structures. World Conference on Timber Engineering.
- Gagnon & Karacabeyli. (2019). Canadian CLT Handbook. FP.Innovation. 1.
- Gagnon & Pirvu. (2011). CLT Handbook. FP.Innovation. 2.
- Gavric, I., Fragiocomo, M. & Ceccotti, A. (2015). Cyclic Behavior of Typical Screwed Connections For Cross Laminated Timber (CLT) Structures. Eur. J. Wood Prod. 73, 179–191.
- Harris. (2015). Cross Laminated Timber. Wood Composites. 141-167.
- Hossain, Popovski, & Tannert. (2018). Cross Laminated Timber Connections Assembled with a Combination of Screws in Withdrawal and Screws in Shear. Engineering Structures. 168, 1-11.
- Loss, C., Piazza, M., Zandonini, R. (2015). Innovative Construction System For Sustainable Buildings. IABSE Conference : Structural Engineering. 163-170.
- Saharso, T., 2024. Analisis Uji Lentur Cross Laminated Timber (CLT) 3 Lapis Pada CLT Akasia dan CLT Akasia-Mindi. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Program S1, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Saputra, Aprili, Eka, Sidabutar, Suciati. (2024). Analisis Penggunaan Kayu Sebagai Bahan Konstruksi Dalam Pembangunan: Studi Kasus Dan Observasi Lapangan. Batam.
- Shahnewaz, M., Alam, S., Tannert, T. (2018) . In Plane Strength And Stiffness Of Cross Laminated Timber Shear Walls. Buildings. 8(8), 100.
- Smith, I., Pedrotti, E., Sadeghi, M., Ballerini, M. (2015). Bending Properties of Connections in Cross Laminated Timber. IABSE Conference : Elegance in Structures. 366-367.
- Standar Nasional Indonesia. (2013). SNI 7973-2013. Tentang Spesifikasi Desain Untuk Konstruksi Kayu. Badan Standarisasi Nasional.
- Tomasi, R., Piazza, M., Angeli, A., Mores, M. (2006). A New Ductile Approach Design of Joints Assembled With Screw Connectors. World Conference on Timber Engineering. 1, 565-570.