

## Kajian Perilaku Lentur Balok *Finger Jointed Laminated Board* (FJLB) Kayu Karet (*Hevea Brasiliensis*)

M. Afif Shulhan<sup>1</sup>, \*Ali Awaludin<sup>2</sup>, Maris Setyo Nugroho<sup>3</sup>, Sherly Octavia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa, Yogyakarta,

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta,

<sup>3</sup>Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta

<sup>\*)</sup>[ali.awaludin@ugm.ac.id](mailto:ali.awaludin@ugm.ac.id)

Received: 11 April 2022 Revised: 22 November 2022 Accepted: 13 Desember 2022

### Abstract

*This study is aimed to determine the flexural behavior of Rubberwood FJLB (finger jointed laminated board) beams as building structural components. It was carried out through experimental approach and numerical analysis on six specimens of FJLB beams having a cross-section of 100 mm by 150 mm and a length of 2850 mm. The experiment was consisted of small specimen tests (BS-373:1957) and four-point bending test (EN-408) with two different cross-sectional orientations (flatwise and edgewise). The numerical analysis was performed by conducting 2-D finite element analysis developed in MATLAB program based on plane stress assumption. It was found that the average flexural capacity of beams tested under edgewise orientation was 24.6 kN, which is higher than that of the beams tested under flatwise orientation, 19.7 kN. However, the flexural stress (modulus of rupture) of those beams was about the same. All the beams experienced brittle failure caused by glueline failure between laminas or at finger joints. The results of strain measurement at mid-span of the beams throughout the test showed that the FJLB beams failed within elastic response. This finding was confirmed by the numerical analysis results.*

**Keywords:** *Hevea brasiliensis, FJLB, flexural, plane stress*

### Abstrak

*Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku lentur balok FJLB (finger jointed laminated board) kayu Karet sebagai komponen struktur bangunan. Penelitian dijalankan melalui pendekatan eksperimen dan analisis numerik terhadap enam buah spesimen balok FJLB dengan dimensi penampang 100 mm x 150 mm dan panjang 2850 mm. Eksperimen terdiri dari pengujian spesimen skala kecil (BS-373:1957) dan uji lentur empat titik (EN-408) dengan dua orientasi penampang yang berbeda (flatwise dan edgewise). Analisis numerik dilaksanakan menggunakan analisis elemen hingga 2-D yang dikembangkan pada program MATLAB berdasarkan asumsi plane stress. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban lentur maksimum pada balok dengan orientasi edgewise mencapai 24,6 kN, lebih tinggi daripada balok dengan orientasi flatwise sebesar 19,7 kN. Meskipun demikian, tegangan lentur (modulus of rupture) kedua orientasi balok tidak berbeda signifikan. Semua benda uji balok mengalami kegagalan yang getas (brittle failure) yang disebabkan kegagalan perekat (glueline) antar lamina atau pada finger joint. Hasil dari pengukuran regangan pada tengah bentang menunjukkan bahwa balok FJLB mengalami kegagalan dengan respon elastik. Hal ini divalidasi analisis numerik.*

**Kata kunci:** *Hevea brasiliensis, FJLB, lentur, plane stress*

### Pendahuluan

Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan spesies yang dikenal sebagai bahan baku industri lateks. Spesies ini berasal dari Brazil dan dibudidayakan juga di Asia Tenggara meliputi Thailand, Malaysia

dan Indonesia. Hingga kini, sebanyak 70% produksi lateks di dunia terkonsentrasi di tiga negara tersebut. Indonesia sendiri memiliki lahan perkebunan pohon Karet mencapai 3,4 juta hektar yang terdistribusi sebanyak 70% di Sumatera, 24 % di Kalimantan dan 4% berada di Jawa (Han &

Nurwati, 2010). Pohon Karet, sebagai penghasil getah, memiliki masa produktif 25-30 tahun sehingga setelah masa tersebut tercapai pohon karet perlu diremajakan (Junior *et al.*, 2015). Proses peremajaan ini akan menghasilkan limbah berupa kayu Karet tua, yang tercatat memiliki potensi produksi sebesar 167,5-345 m<sup>3</sup>/ha (Kusumawardi *et al.*, 2018). Jumlah tersebut dinilai cukup besar sehingga perlu dilakukan usaha meningkatkan nilai ekonomis, limbah kayu Karet tua.

Berkaitan dengan upaya pemanfaatan kayu Karet tua, beberapa penelitian telah dilakukan untuk melihat peluang penggunaan kayu Karet tua sebagai material struktur bangunan. Okino *et al.* (2004), Lamaming *et al.* (2020), dan Amini *et al.* (2013) telah memperkenalkan papan partikel (*particle board*) kayu Karet yang berhasil memenuhi standar JIS dan ASTM. Ketiga kajian tersebut memanfaatkan limbah kayu Karet yang berbentuk serpih (*chipping*) maupun serbuk sebagai bahan baku papan partikel. Namun, perbedaan mendasar ketiga kajian tersebut adalah pada penggunaan jenis perekat (*binder*). Okino *et al.* (2004) menggunakan binder berupa semen portland dan bahan katalis, sementara Amini *et al.* (2013) mencoba memanfaatkan *glutardialdehyde* (pati jagung termodifikasi). Lamaming *et al.* (2020) sendiri menggunakan perekat berbasis *polyvinyl alcohol*.

Selain produk berupa papan partikel, terdapat kajian pemanfaatan kayu Karet sebagai CLT (*cross laminated timber*) oleh Srivaro *et al.* (2021) dan Yusoh *et al.* (2021). Kedua penelitian tersebut secara umum mengungkapkan bahwa CLT kayu Karet cenderung memiliki kapasitas lentur yang lebih tinggi daripada CLT berbahan baku kayu lunak (*softwood*) yang lazim digunakan di Eropa maupun Amerika. Dengan demikian, kayu Karet dinilai memiliki peluang yang besar untuk dapat digunakan sebagai komponen struktur dalam bentuk CLT.

Penggunaan kayu Karet sebagai glulam telah diteliti oleh Parra-Serrano *et al.* (2018) dan Junior *et al.* (2015). Menurut kedua peneliti, sifat mekanik yang ada pada kayu Karet memungkinkan untuk digunakan sebagai bahan penyusun balok glulam. Namun demikian, balok glulam dari kayu Karet disarankan untuk dibatasi pada bangunan sederhana dan bertingkat rendah. Hal ini disebabkan kelas kayu Karet berada di bawah jenis-jenis kayu struktur, meskipun lebih baik dibandingkan kelas kayu lunak (Junior *et al.*, 2015).

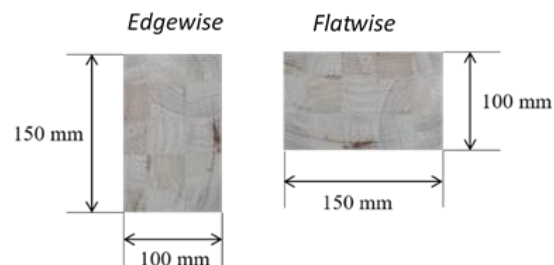
Parra-Serrano *et al.* (2018) memberikan penekanan bahwa penggunaan *finger joint* pada sambungan lamina balok glulam perlu diperhatikan. Hal ini disebabkan ketidaksempurnaan dalam peletakan

dan pelaksanaan *finger joint* yang memiliki kecenderungan sebagai titik inisiasi kegagalan pada balok glulam. Namun demikian, proses laminasi yang baik tetap memungkinkan kayu Karet dapat memenuhi ketentuan struktural (Parra-Serrano *et al.*, 2018). Dengan melalui proses laminasi, produksi glulam yang lebih homogen dapat dicapai karena cacat kayu dan ketidaksempurnaan kayu dapat didistribusikan secara acak pada balok. Selain itu, faktor keberadaan lapisan perekat (*glue-line*) juga menyumbang peningkatan kapasitas balok glulam (Srivaro *et al.*, 2021).

Berdasarkan kajian-kajian yang telah disebutkan di atas, penelitian ini mengidentifikasi bahwa belum ada pemanfaatan kayu Karet dalam bentuk FJLB (*finger jointed laminated board*) sebagai elemen struktural bangunan. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki tujuan untuk memperoleh gambaran sifat lentur (beban lentur, tegangan lentur dan pola kegagalan) balok FJLB. Dengan diketahuinya sifat lentur balok FJLB, penelitian ini diharapkan dapat membuka peluang balok FJLB untuk diaplikasikan sebagai komponen struktur bangunan.

## Metode

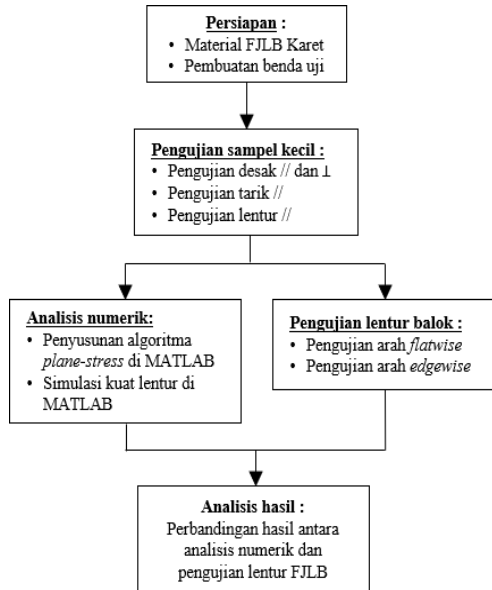
Penelitian ini mempergunakan enam buah benda uji balok FJLB dengan penampang sebesar 100 x 150 mm dan panjang 2850 mm yang diproduksi oleh PT. Puncak Menara Hijau Mas. Setiap balok FJLB, tersusun dari lamina-lamina dengan ukuran 30x30x100 mm yang direkatkan pada arah sejajar serat mempergunakan *finger joint*. *Butt joint* digunakan dalam perekatan lamina pada arah tegak lurus serat. Pengujian lentur enam buah balok dilaksanakan pada dua orientasi penampang yang berbeda, yaitu *flatwise* dan *edgewise*, dan diilustrasikan melalui Gambar 1.



Gambar 1. Orientasi penampang balok FJLB

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimen dan analisis numerik dengan langkah yang disajikan melalui diagram alir pada Gambar 2. Eksperimen diawali dengan pemeriksaan sifat mekanik FJLB yang meliputi uji tekan sejajar serat, uji tarik sejajar serat, dan uji lentur. Untuk setiap pengujian digunakan lima buah sampel kecil (*small clear specimen*) yang diambil dari balok FJLB utuh

secara acak. Pengujian tekan, tarik dan lentur dilaksanakan dengan dimensi benda uji dan prosedur sesuai standar BS-373:1957 (*British Standard Methods of Testing Small Clear Specimen of Timber*).



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Langkah selanjutnya, hasil uji sifat mekanik sampel kecil menjadi *input* analisis numerik yang dikembangkan pada MATLAB R2012 dengan menggunakan teori *plane stress*. Algoritma elemen hingga tersebut merupakan pengembangan dari algoritma yang disusun oleh Khennane (2013) dan Awaludin *et al.* (2019).

Pemodelan geometri pada analisis elemen hingga mempergunakan *meshing element* berupa elemen *quadrilateral* 4 nodal dengan pemodelan material berupa bilinear elastoplastik. Pada model material tersebut perilaku linier material dimodelkan dengan menyusun matriks kekakuan elastik  $[D]$ , sementara perilaku elastoplastik diakomodir oleh matriks kekakuan elastoplastik  $[D_{ep}]$  pada Persamaan 1. Matriks  $[D_{ep}]$  dibentuk dari matriks  $[D]$  yang dimodifikasi berdasarkan *stress state* yang berlaku pada increment pembebanan tertentu.

$$D^{ep} = D - \frac{D \frac{\partial g}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D}{\left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D \frac{\partial g}{\partial \sigma}} \quad (1)$$

Matriks kekakuan elastoplastik  $[D_{ep}]$  akan menggantikan matriks kekakuan elastik  $[D]$  saat kriteria kelelahan ( $F$ ) pada Persamaan 2 terlampaui. Kriteria kelelahan (*yield surface*) pada Persamaan 2 merupakan fungsi dari *stress state* ( $\underline{\sigma}$ ), *kinematic hardening* ( $\underline{\kappa}$ ), dan *isotropic hardening* ( $\kappa$ ) (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

$$F(\underline{\sigma}, \underline{\kappa}, \kappa) = 0 \quad (2)$$

Regangan plastis ( $\varepsilon_p$ ) pada pemodelan material elastoplastik diturunkan dari *plastic potential* ( $g$ ) yang mengikuti Persamaan 3. Parameter *plastic potential* didekati menggunakan asumsi bahwa  $g = f$  sehingga bentuk Persamaan 3 berubah menjadi Persamaan 4 yang disebut sebagai *associated flow rule* (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = d\lambda \nabla g \quad (3)$$

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} = d\lambda \nabla f \quad (4)$$

Proses pembebanan model *plane stress* dilakukan secara iteratif mulai dari beban nol hingga beban lentur maksimum tercapai. Iterasi pembebanan akan berhenti apabila pengukuran tegangan normal dan tegangan geser melampaui *Hill's yield function* pada Persamaan 5. Komponen  $F$ ,  $G$ , dan  $H$  pada Persamaan 5 merupakan *normal stress constant* dan  $L$ ,  $M$ ,  $N$  merupakan *shear stress constant* (ADINA Inc., 2012).

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{23}^2 - 1 = 0 \quad (5)$$

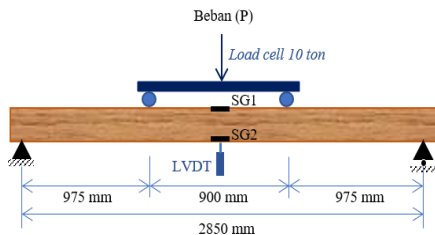
Selain kriteria tersebut, iterasi pembebanan juga akan berhenti apabila pengukuran regangan mengindikasikan bahwa regangan maksimum telah tercapai. Pengukuran regangan pada model *plane stress* merupakan penjumlahan dari regangan elastik dan regangan plastis seperti tersaji melalui Persamaan 6 (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad (6)$$

Simultan dengan analisis numerik, dilaksanakan eksperimen berupa uji lentur 4 titik pada balok FJLB dengan dimensi penampang 150 x 100 mm dan panjang bentang 2850 mm sebanyak 6 balok. Prosedur uji lentur balok mengacu pada standar EN 408 (*Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*) dengan skema pengujian disajikan pada Gambar 3.

Parameter yang diukur melalui uji lentur antara lain beban lentur, perpindahan, dan regangan yang dilakukan pada tengah bentang. Beban lentur ( $P$ ) diukur mempergunakan *load cell* kapasitas 100 kN yang terhubung pada dongkrak hidrolik kapasitas 300 kN. Perpindahan diukur dengan menggunakan dua buah LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) pada sisi kanan dan kiri balok di tengah bentang. *Strain gauge* (SG) dengan *gauge resistance* sebesar  $120 \pm 0,3 \Omega$  dipasang di tengah bentang dengan jumlah 2 buah (SG1 pada serat tekan dan SG2 di serat tarik). Pembacaan *load cell*

(beban), LVDT (perpindahan) dan strain gauge (regangan) akan menjadi parameter pembandingan terhadap hasil analisis numerik. Perbandingan antara uji lentur balok FJLB dan analisis numerik dilakukan untuk melihat kesesuaian analisis numerik dalam memprediksi perilaku lentur balok FJLB tersebut.



Gambar 3. Skema pengujian lentur balok FJLB

## Hasil dan Pembahasan

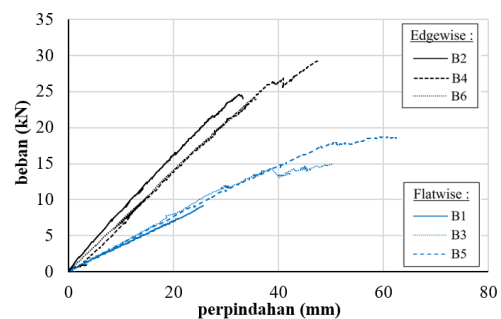
### Pengujian sifat mekanik

Pengujian sifat mekanik berdasarkan sampel kecil (BS-373:1957) dilakukan untuk mengetahui karakter material kayu Karet terhadap pembebanan tekan, tarik dan lentur sejajar serat ( $//$ ). Hasil uji sampel kecil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kayu Karet yang digunakan sebagai lamina balok FJLB memiliki nilai MoE lentur sebesar 7741 MPa yang setara dengan kelas kayu E7 pada SNI-7973:2013. Tabel 1 memperlihatkan bahwa nilai tegangan tarik sebesar 80,5 MPa, lebih dominan dibandingkan tegangan tekan (44.18 MPa). Sejalan dengan itu, nilai MoE tarik (10026 MPa) yang hampir empat kali lebih besar dari MoE tekan sebesar 2640 MPa. Sifat tarik yang lebih dominan dari sifat desak menurut Buchanan (1990) akan

mengindikasikan kegagalan balok yang bersifat plastis, yang ditandai dengan profil tegangan penampang sisi tekan yang tidak linier. Pola kegagalan balok tersebut akan dikonfirmasi lebih dalam melalui pengujian lentur dan analisis numerik.

### Pengujian lentur balok FJLB

Pengujian lentur balok FJLB memperoleh perilaku lentur yang disajikan dalam kurva hubungan beban-perpindahan pada Gambar 4. Melalui Gambar 4, balok dengan orientasi *edgewise* terlihat memiliki kekakuan (MoE) dan beban lentur maksimum ( $P_{max}$ ) yang lebih tinggi daripada balok dengan orientasi *flatwise*. Meskipun kedua orientasi balok memiliki dimensi penampang sama (100x150 mm), tetapi keduanya memiliki inersia penampang yang jauh berbeda. Balok dengan orientasi *edgewise* memiliki inersia ( $I_x$ ) sebesar  $2,8 \times 10^7 \text{ mm}^4$ , dan inersia balok *flatwise* hanya sebesar  $1,2 \times 10^7 \text{ mm}^4$ . Perbedaan nilai inersia akibat orientasi pembebanan balok membawa pengaruh yang signifikan pada beban lentur maksimum.



Gambar 4. Grafik beban-perpindahan FJLB

Tabel 1. Sifat mekanik berdasarkan sampel kecil BS-373:1957

Kode	Uji tarik //			Uji tekan //			Uji lentur //		
	$F_{t//}$	$\epsilon_{t,u}$	MoE $t//$	$F_{c//}$	$\square_{c,y}$	$\square_{c,u}$	MoE $c//$	$F_{b//}$	MoE $b//$
SC1	93,08	0,0069	13401	46,80	0,0139	0,0214	2782	81,25	8089
SC2	78,49	0,0086	9157	47,35	0,0133	0,0232	2933	91,17	9491
SC3	81,87	0,0134	6132	38,59	-	-	-	90,79	7165
SC4	83,22	0,0062	13320	42,03	0,0145	0,0258	2260	82,21	8155
SC5	65,87	0,0081	8121	46,14	0,0123	0,0317	2586	62,80	5808
<b>rerata</b>	<b>80,50</b>	<b>0,0086</b>	<b>10026</b>	<b>44,18</b>	<b>0,0135</b>	<b>0,0255</b>	<b>2640</b>	<b>81,64</b>	<b>7741</b>

Catatan : Satuan tegangan dalam  $\text{N/mm}^2$ ,  $y$  : yield,  $u$  : ultimate

Tabel 2. Kuat lentur, tegangan lentur, dan regangan balok FJLB

Kode	Orientasi	$P_{max}$ (kN)	MoR ( $\text{N/mm}^2$ )	MoR <sub>avg</sub> ( $\text{N/mm}^2$ )	$\epsilon_{c,u}$	$\epsilon_{t,u}$
B1	Flatwise	16,6	32,4	33,3	-0,0025	0,0027
B3		15,0	29,2		-0,0029	0,0026
B5		19,7	38,5		-0,0033	0,0028
B2	Edgewise	24,6	32,0	33,8	-0,0022	0,0018
B4		29,2	38,0		-0,0039	0,0040
B6		24,1	31,3		-0,0028	0,0029

\*satuan gaya dalam kN dan tegangan dalam  $\text{N/mm}^2$

Tabel 2 menyajikan nilai beban lentur ( $P_{max}$ ), tegangan lentur (*modulus of rupture*) dan regangan runtuh pada serat tarik dan serat tekan benda uji balok FJLB. Terlihat bahwa balok dengan orientasi *edgewise* memiliki beban lentur maksimum antara 24,1-29,2 kN sementara balok *flatwise* antara 16,6 – 19,7 kN. Namun, meskipun nilai beban lentur maksimum ( $P_{max}$ ) terpaut hampir dua kali lipat, nilai tegangan lentur rerata ( $MoR_{avg}$ ) kedua orientasi balok tersebut ternyata tidak jauh berbeda. Balok *flatwise* memiliki tegangan lentur rerata ( $MoR_{avg}$ ) sebesar 33,3 MPa, sementara balok *edgewise* sebesar 33,8 MPa).

Nilai regangan saat runtuh pada juga menunjukkan pola yang sama. Nilai regangan tekan ( $\epsilon_{c,u}$ ) dan tarik ( $\epsilon_{t,u}$ ) antara balok *flatwise* dan *edgewise* juga dalam rentang nilai yang tidak jauh berbeda. Hal ini disebabkan nilai inersia ( $I_x$ ) sudah menjadi pembagi beban lentur ( $P_{max}$ ) dalam perhitungan rumus tegangan dan regangan, sehingga nilai tegangan dan regangan lebih berkorelasi ke sifat mekanik kayu lamina.

Nilai tegangan lentur rerata balok FJLB diketahui sebesar 33,3 MPa (*flatwise*) dan 33,8 MPa (*edgewise*). Sementara, pada Tabel 1, diketahui nilai tegangan lentur rerata sampel kecil sebesar 81,64 MPa. Apabila diperbandingkan antar nilai tegangan lentur, ditemukan perbedaan yang signifikan antara nilai tegangan lentur balok FJLB dan sampel kecil. Tegangan lentur dari sampel kecil cenderung lebih besar dari tegangan lentur balok FJLB. Hal ini disebabkan karena pengujian sampel kecil memiliki dimensi yang relatif kecil, yang tentunya kurang mewakili adanya garis perekat (*glueline*) dan *finger joint* pada balok FJLB.

Pengujian yang dilakukan pada enam buah balok FJLB menghasilkan pola kegagalan yang tipikal dengan ilustrasi tersaji pada Gambar 5 dan 6. Tipikal kegagalan balok FJLB cenderung terjadi secara getas (*brittle*) pada bentang di antara dua titik beban. Pada bentang balok tersebut, balok memiliki gaya dalam berupa momen lentur dan gaya geser yang mempunyai nilai maksimum dibandingkan bentang lain.

Secara lebih mendetail, kegagalan yang terjadi pada balok FJLB bukan merupakan kegagalan lamina kayu melainkan kegagalan perekat pada *finger joint* yang kemudian merambat mengikuti garis perekat (*glue line*) pada arah longitudinal (Gambar 5). Selain itu, peletakan *finger joint* yang hampir segaris (Gambar 6) juga turut menyumbang kontribusi dalam pola kegagalan getas.

Apabila perekat dan *finger joint* dapat bekerja secara sempurna, maka diperkirakan tegangan

lentur balok FJLB dapat mendekati nilai tegangan sampel kecil (81.64 MPa). Hal ini akan dikonfirmasi lebih lanjut melalui analisis numerik.



Gambar 5. Finger joint dan glue line telah gagal



Gambar 6. Kegagalan finger joint

Analisis numerik

Analisis elemen hingga atau *finite element analysis* (FEA) dilakukan dengan memanfaatkan program MATLAB dengan asumsi pemodelan dua dimensi mengikuti teori *plane stress*. Pemodelan numerik dilaksanakan terhadap balok dengan orientasi *edgewise* dan *flatwise* sesuai dengan geometri benda uji dan skema pengujian balok FJLB.

Sifat mekanik pada Tabel 1 menjadi parameter input dalam analisis numerik. Namun demikian, dikarenakan keterbatasan spesimen, maka tidak semua parameter input tersedia melalui pengujian sampel kecil. Parameter yang tidak tersedia didekati dengan data sekunder dari penelitian terdahulu yang disajikan dalam Tabel 3 (parameter tekan) dan Tabel 4 (parameter tarik).

Data dalam Tabel 3 dan Tabel 4 digunakan untuk menyusun konstitutif material elastis untuk sifat tarik dan tekan yang dituangkan dalam matriks [D]. Hubungan sifat tekan dan tarik secara visual dapat dimodelkan melalui grafik model hubungan tegangan regangan pada Gambar 7.



Tabel 3. Input parameter tekan FJLB

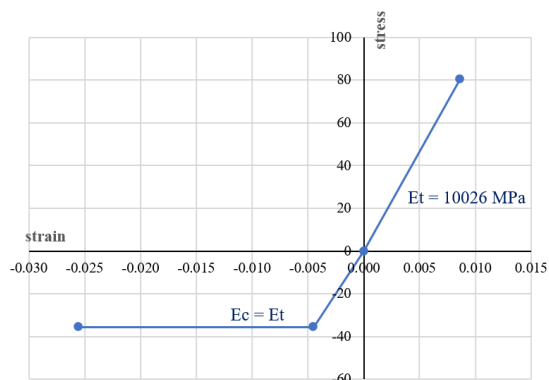
Parameter	Nilai	Sumber
$E_c$	2640,320	pengujian
$\epsilon_{y11}$	0,013	pengujian
$\epsilon_{u11}$	0,026	pengujian
$\sigma_{u11}$	44,180	pengujian
$\sigma_{y11}$	35,560	pengujian
$\sigma_{u22}$	11,240	(Junior <i>et al.</i> , 2015)
$\sigma_{y22}$	5,940	(Junior <i>et al.</i> , 2015)
$\tau_{12}$	9,430	(Junior <i>et al.</i> , 2015)
$G_c$	1077,680	(Bodig & Jayne, 1982)
$\rho$	0,630	pengujian
$\nu_{12}$	0,230	(Awaludin <i>et al.</i> , 2019)
$\nu_{21}$	0,050	(Awaludin <i>et al.</i> , 2019)

\* satuan tegangan dalam  $N/mm^2$

Tabel 4. Input parameter tarik FJLB

Parameter	Nilai	Sumber
$E_t$	10026,270	pengujian
$\epsilon_{u11}$	0,009	pengujian
$\sigma_{u11}$	80,500	pengujian
$\sigma_{u22}$	4,230	Junior <i>et al.</i> (2015)
$\tau_{12}$	9,430	Junior <i>et al.</i> (2015)
$G_t$	1077,680	Bodig & Jayne (1982)

\* satuan tegangan dalam  $N/mm^2$

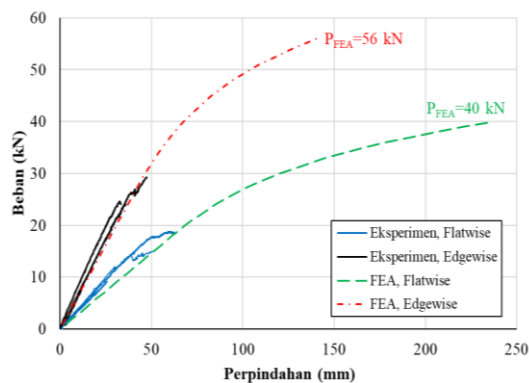


Gambar 7. Modelan hubungan tegangan-regangan sifat tekan dan tarik

Melalui Gambar 7 dapat diamati bahwa sifat tarik dimodelkan sebagai material elastis, sementara sifat tekan diasumsikan berperilaku sebagai bilinear elastoplastis. Pada model tersebut, sifat tekan akan tetap berperilaku elastis sampai titik leleh tertentu dan setelahnya akan memasuki fase plastis. Fase plastis ditandai dari grafik tegangan regangan yang mendatar.

Pengujian tekan dan tarik sampel kecil (Tabel 3 dan Tabel 4) memperoleh gambaran bahwa uji tekan dan uji tarik menghasilkan MoE yang berbeda signifikan, yaitu sebesar 2640 MPa (tekan) dan 10026 MPa (tarik). Buchanan (1990) dan Awaludin *et al.* (2019) menyarankan untuk menggunakan nilai MoE tarik dalam pemodelan *plane stress*,

untuk mendapatkan hasil analisis numerik yang lebih akurat. Oleh karena itu, analisis numerik penelitian ini menggunakan nilai MoE sebesar 10026 MPa sebagai nilai MoE untuk sifat tekan maupun tarik. Analisis numerik menghasilkan *output* berupa visualisasi kontur tegangan (Gambar 10 dan 11), kurva beban-perpindahan (Gambar 8), kurva tegangan-regangan (Gambar 9) dan profil tegangan regangan penampang (Tabel 5 dan 6).



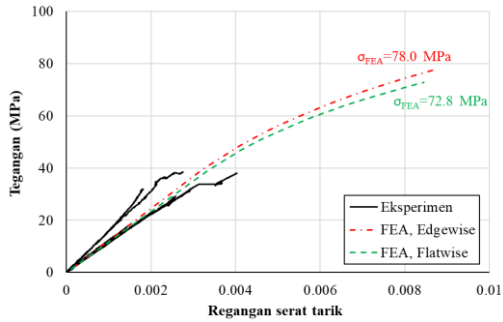
Gambar 8. Kurva beban-perpindahan analisis numerik

Pada Gambar 8 menyajikan hasil kurva beban-perpindahan yang telah disandingkan dengan beban-perpindahan dari hasil uji balok FJLB. Secara visual dapat diamati bahwa pemodelan numerik menghasilkan kurva dengan kekakuan awal (*initial stiffness*) yang mendekati eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan numerik mampu memodelkan dengan akurat beban-perpindahan pada zona elastis, yaitu saat kurva beban-perpindahan masih linier. Pemodelan numerik memprediksikan bahwa kurva beban-perpindahan akan berupa lengkung yang mencapai beban lentur sebesar 56 kN (balok *edgewise*) dan 40 kN (balok *flatwise*). Nilai beban lentur numerik lebih besar daripada beban lentur balok FJLB (16-24 kN). Hal ini disebabkan pemodelan numerik mengasumsikan bahwa perekat dan *finger joint* bekerja secara sempurna, sehingga kegagalan balok akan selalu terjadi pada lamina kayu, bukan pada perekat.

Perilaku plastis pada kurva beban-perpindahan antara numerik dan eksperimen tidak dapat diperbandingkan karena balok FJLB telah gagal sebelum memasuki zona plastis. Sebagaimana diketahui melalui Gambar 8, balok FJLB gagal pada zona elastik (kurva linier).

Hal yang serupa dengan respon beban-perpindahan juga ditemui pada respon tegangan-regangan. Gambar 9 memperlihatkan bahwa model numerik menghasilkan prediksi kurva tegangan-regangan yang mendekati hasil eksperimen. Hasil eksperimen

yang dimaksud pada Gambar 9 adalah data pembacaan strain gauge pada serat tarik (SG2).



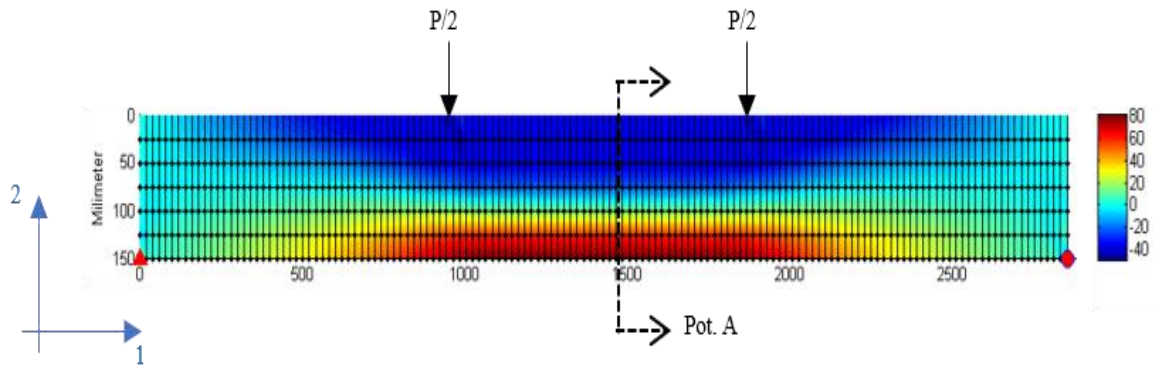
**Gambar 9. Pemodelan numerik kurva tegangan-regangan**

Gambar 9 memperlihatkan bahwa analisis numerik memperoleh perkiraan nilai tegangan lentur balok FJLB mencapai 78 MPa untuk balok *edgewise* dan 72,8 MPa untuk balok *flatwise*. Nilai tegangan lentur tersebut tercapai ketika serat tarik pada balok mengalami kegagalan yang ditandai dengan regangan pada serat tarik ( $\epsilon_t$ ) telah mencapai 0,008. Nilai tegangan lentur numerik sebesar 78 MPa (*edgewise*) dan 72,8 MPa (*flatwise*) dinilai cukup mendekati nilai tegangan lentur spesimen kecil (81,64 MPa). Terdapat selisih sekitar 8 MPa atau setara 10,8% antara analisis numerik dan uji spesimen kecil. Menurut Buchanan (1990), selisih antara spesimen kecil dan benda uji dapat berasal dari sumbangsih faktor ukuran spesimen (*size*

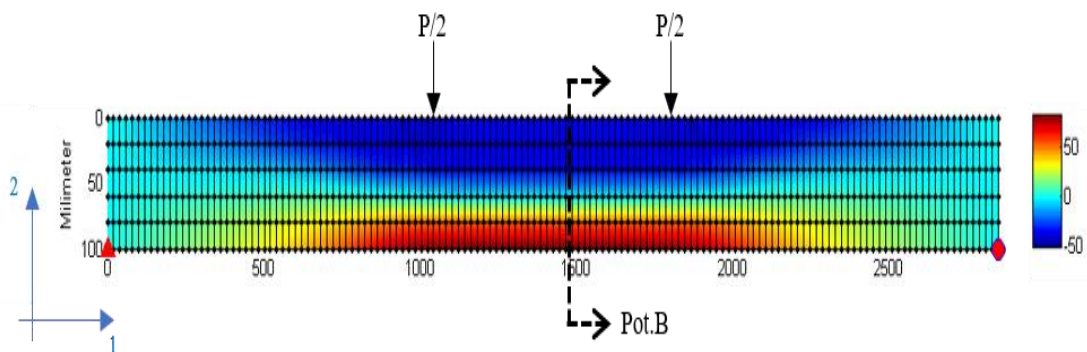
*factor*). Analisis numerik menghasilkan visualisasi kontur tegangan normal arah longitudinal ( $\sigma_{11}$ ) yang tersaji dalam Gambar 10 dan 11. Pada kedua ilustrasi tersebut, bagian balok dengan zona warna biru merupakan daerah dimana balok mengalami tegangan  $\sigma_{11}$  tekan, sementara daerah dengan warna merah memiliki  $\sigma_{11}$  berupa tarik.

Secara visual dapat diamati bahwa zona tekan (warna biru) cenderung lebih dominan dibandingkan zona tarik yang bermakna bahwa garis netral telah bergeser ke bawah melebihi separuh tinggi penampang ( $d/2$ ). Fenomena ini menunjukkan bahwa, untuk dapat mempertahankan kesetimbangan kopel gaya tekan dan tarik, blok tekan bergeser semakin ke bawah mendekati serat tarik. Pergeseran garis netral terus terjadi hingga kegagalan balok tercapai ketika regangan serat tarik telah mencapai 0,008. Pola kegagalan balok secara numerik dikonfirmasi lebih lanjut melalui profil tegangan dan regangan di tengah bentang (Tabel 5 dan 6).

Tabel 5 menyajikan profil tegangan dan regangan pada balok FJLB dan model numerik untuk balok dengan orientasi *edgewise*. Profil tegangan model balok *edgewise* memperlihatkan bahwa blok tekan pada penampang balok sudah berperilaku plastis. Dapat diamati pada Tabel 5, profil tegangan penampang tidak lagi linier antara tegangan blok tekan dan blok tarik serta garis netral telah bergeser melebihi  $d/2$  penampang.

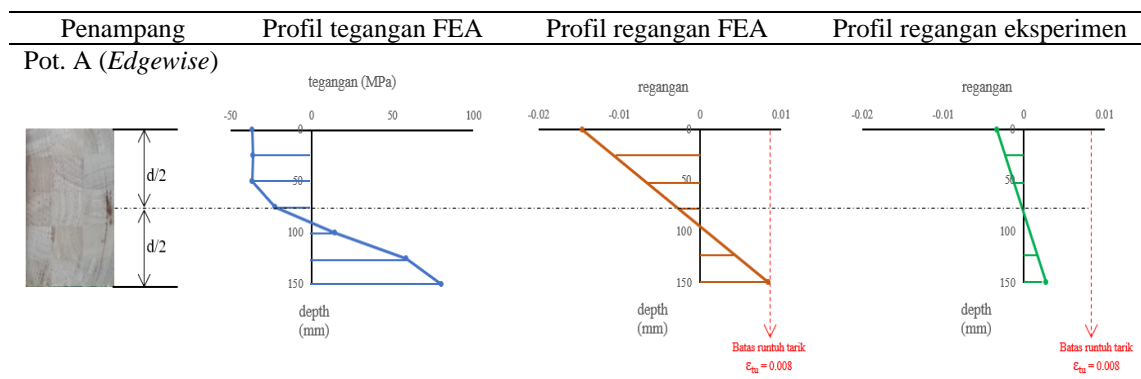


**Gambar 10. Distribusi tegangan normal ( $\sigma_{11}$ ) balok edgewise**

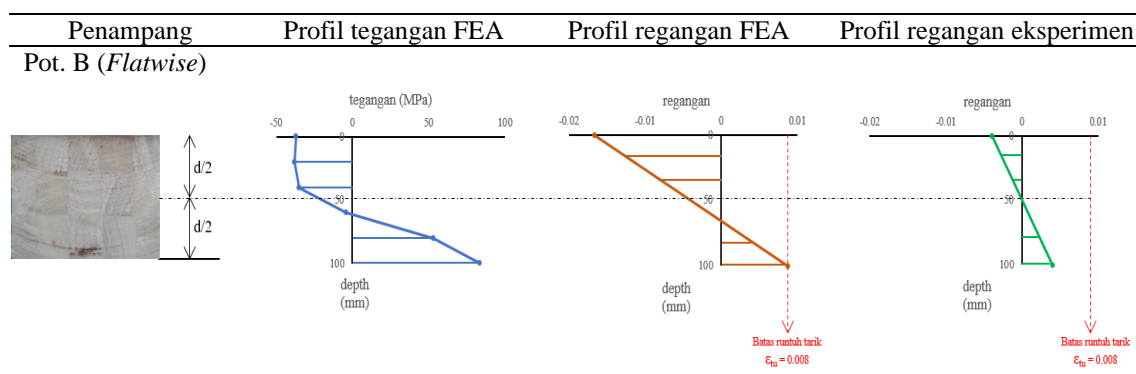


**Gambar 11. Distribusi tegangan normal ( $\sigma_{11}$ ) balok flatwise**

**Tabel 4. Perbandingan profil tegangan dan regangan penampang pada balok *edgewise***



**Tabel 5. Perbandingan profil tegangan dan regangan penampang pada balok *flatwise***



Kegagalan pada model balok dengan orientasi *edgewise* terjadi ketika batas regangan tarik telah tercapai ( $\epsilon_u=0.008$ ) yang terkonfirmasi melalui profil regangan FEA pada Tabel 5. Kegagalan balok FJLB secara getas (*brittle*) yang terjadi pada perekat dan *finger joint* mengindikasikan bahwa balok masih berperilaku elastik saat gagal. Hal ini juga terkonfirmasi melalui profil regangan pada Tabel 5 yang memperlihatkan bahwa regangan pada serat tarik balok FJLB masih jauh di bawah batas regangan tarik sebesar 0,008. Hasil bacaan *strain gauge* (SG2) pada balok FJLB *edgewise* mencatat bahwa balok gagal saat pembacaan regangan tarik mencapai 0,003.

Secara umum, Tabel 6 mengungkap fenomena yang serupa untuk model balok dengan orientasi *flatwise*. Kegagalan pada model numerik balok *flatwise* juga terjadi saat balok mencapai kondisi non-elastis dan gagal pada serat tarik. Profil tegangan dan regangan pada model balok *flatwise* identik dengan model balok *edgewise*.

## Kesimpulan

Eksperimen yang dilakukan pada balok FJLB memperoleh kesimpulan bahwa orientasi penampang balok menjadi penentu dalam capaian

kuat lentur kedua tipe balok. Balok *edgewise* memiliki beban lentur mencapai 29.2 kN, hampir dua kali lipat lebih besar daripada balok *flatwise* (16.6 kN). Namun, tegangan lentur kedua tipe balok tidak berbeda signifikan (33.3 dan 33.8 MPa) dengan pola kegagalan getas (*brittle*) pada perekat antar lamina dan *finger joint* serat tarik. Hasil eksperimen dikonfirmasi melalui analisis numerik yang menunjukkan bahwa pengukuran regangan balok FJLB masih jauh di bawah batas keruntuhan material tarik dan masih berada pada respon elastik.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Puncak Menara Hijau Mas yang telah menyediakan sampel FJLB serta Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas dukungan pendanaan operasional penelitian. Penghargaan yang sebesar-besarnya disampaikan kepada segenap Teknisi Laboratorium Struktur, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada atas bantuan dalam pelaksanaan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

ADINA Inc. (2012). Volume I: ADINA Solids &



- Structures. *ADINA Theory and Modeling Guide*, I(December), 1–1166. www.adina.com
- Amini, M. H. M., Hashim, R., Hiziroglu, S., Sulaiman, N. S., & Sulaiman, O. (2013). Properties of particleboard made from rubberwood using modified starch as binder. *Composites Part B: Engineering*, 50, 259–264.
- Awaludin, A., Irawati, I. S., & Shulhan, M. A. (2019). Two-dimensional finite element analysis of the flexural resistance of LVL Sengon non-prismatic beams. *Case Studies in Construction Materials*, 10.
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composite*.
- Buchanan, A. H. (1990). Bending Strength of Lumber. *Journal of Structural Engineering*, 116(5), 1213–1229.
- Han, R., & Nurwati, H. (2010). Pengaruh Susunan Lamina Kayu Karet Tua Terhadap Sifat Kekuatan Balok Silang-I Laminasi. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 28(2), 130–144.
- Junior, H. de J. E., Ohto, J. M., da Silva, L. L., Lara Palma, H. A., & Ballarin, A. W. (2015). Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: a case study in Brazil. *Journal of Wood Science*, 61(4), 384–390.
- Khennane, A. (2013). Introduction to finite element analysis using MATLAB® and abaqus. In *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and ABAQUS*. CRC press.
- Kusumawardani, M. R., Hamzah, F., & Hamzah, F. H. (2018). Karakteristik Sifat Fisika Batang Karet Non Produktif. *Jurnal Online Mahasiswa*, 5, 188–194.
- Lamaming, J., Heng, N. B., Owodunni, A. A., Lamaming, S. Z., Khadir, N. K. A., Hashim, R., Sulaiman, O., Mohamad Kassim, M. H., Hussin, M. H., Bustami, Y., Amini, M. H. M., & Hiziroglu, S. (2020). Characterization of rubberwood particleboard made using carboxymethyl starch mixed with polyvinyl alcohol as adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107731.
- Okino, E. Y. A., De Souza, M. R., Santana, M. A. E., Alves, M. V. D. S., De Sousa, M. E., & Teixeira, D. E. (2004). Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 729–734.
- Parra-Serrano, L. J., Piva, M. E. M., Cerchiari, A. M. F., Lima, I. L. de, & Garcia, J. N. (2018). Use of *Hevea brasiliensis* Rubberwood for Glulam Beam Production. *Floresta e Ambiente*, 25(2).
- Srivaro, S., Leelatanon, S., Setkit, M., Matan, N., Khongtong, S., Jantawee, S., & Tomad, J. (2021). Effects of manufacturing parameters on properties of rubberwood-cross laminated timber manufactured via hot pressing. *Journal of Building Engineering*, 44(April).
- Yusoh, A. S., Md Tahir, P., Anwar Uyup, M. K., Lee, S. H., Husain, H., & Khaidzir, M. O. (2021). Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. *Construction and Building Materials*, 273, 121721.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for Solid And Structural Mechanics* (6th ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.