



## Evaluasi Perilaku Lentur Balok Tinggi LVL Sengon dengan Pengekang Lateral pada kedua Tumpuan

\*Ali Awaludin, Urwatul Wusqo

Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

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

Received: 19 Januari 2021 Revised: 29 Oktober 2021 Accepted: 1 November 2021

### Abstract

*Slender beams (beams having a large section height to width ratio ( $d/b$ )) are commonly used in a structure that needs a large bending moment capacity. However, the use of slender beams in a structure is susceptible to overturning and torsion occurrence. Therefore, lateral bracing is usually placed in several points of the beam to prevent lateral-torsional buckling. In this study, a three-point bending test was conducted to evaluate the capacity of 250 mm x 50 mm x 2500 mm Laminated Veneer Lumber (LVL) beams made from Sengon. Two lateral supports were placed at both ends to prevent the beam's lateral displacement. The bending test result shows that the ultimate load of the LVL beam reach 27.88 kN before failure. Furthermore, the LVL beams' bending capacity was calculated using the mechanical properties provided by several previous studies. The LVL beam's capacity was predicted using manual calculation (based on SNI 7973: 2013) and numerical analysis. Numerical analysis was performed using ABAQUS software, and the results were evaluated using the Tsai-Hill and maximum strain failure criterion. The results showed that the maximum strain criterion provides a better prediction of the LVL beam's capacity than Tsai-Hill failure criterion.*

**Keywords:** *Slender beam, LVL sengon, lateral bracing, failure criterion, flexural capacity*

### Abstrak

*Balok dengan dengan rasio tinggi terhadap lebar penampang ( $d/b$ ) yang besar biasanya digunakan pada struktur yang membutuhkan kapasitas momen lentur yang besar. Namun demikian, penggunaan balok dengan rasio  $d/b$  yang tinggi ini memiliki kerentanan akan terjadinya guling/torsi pada struktur. Oleh karena itu, pengekang lateral perlu ditambahkan untuk mencegah terjadinya tekuk torsi lateral pada balok. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian lentur tiga titik pada sampel balok uji Laminated Veneer Lumber (LVL) dari sengon berukuran 250 mm x 50 mm x 2500 mm yang diberi pengekang lateral pada kedua ujungnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beban ultimit yang dapat ditahan oleh balok LVL adalah sebesar 27,88 kN. Properti mekanik dasar dari material LVL sengon yang didapatkan dari beberapa penelitian sebelumnya digunakan untuk mencari nilai kapasitas balok LVL. Sementara itu, kapasitas balok dicari menggunakan perhitungan manual (berdasarkan SNI 7973:2013) dan analisa numerik. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ABAQUS dan hasilnya dievaluasi menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Hill dan regangan maksimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kriteria regangan maksimum mampu memberikan nilai kapasitas balok LVL yang lebih dekat dengan sampel yang diuji di laboratorium dibandingkan dengan kriteria kegagalan Tsai-Hill.*

**Kata kunci:** *Balok Tinggi, LVL sengon, pengekang lateral, kriteria kegagalan, kapasitas lentur*

### Pendahuluan

Penggunaan material berbahan dasar kayu pada struktur bangunan memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan bangunan beton konvensional, sehingga memiliki

potensi yang besar untuk kemudian dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi yang ramah lingkungan (Asdrubali *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2016; Pajchrowski *et al.*, 2014). Namun demikian, bangunan yang terbuat dari material kayu biasanya membutuhkan dimensi balok dan kolom yang

cukup besar. Pada komponen balok, salah satu gaya yang bekerja paling dominan adalah gaya geser dan momen lentur. Penggunaan elemen dengan rasio tinggi terhadap lebar penampang ( $d/b$ ) yang besar akan menghasilkan struktur yang lebih kaku sehingga dinilai lebih menguntungkan untuk digunakan pada struktur yang membutuhkan kapasitas lentur yang besar. Besarnya rasio  $d/b$  yang digunakan pada struktur balok akan mempengaruhi kapasitas ultimitnya (Oka, 2009).

Dalam penerapannya, balok kayu konvensional dengan rasio  $d/b$  yang tinggi sulit didapatkan di lapangan. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya diameter pohon yang digunakan sebagai bahan baku kayu gergajian. Namun demikian, dengan perkembangan teknologi laminasi saat ini, pembuatan balok dengan nilai rasio  $d/b$  yang tinggi serta memiliki kapasitas lentur dan geser yang besar sangat dimungkinkan. Produk kayu rekayasa yang diproduksi dengan teknologi laminasi ini juga memiliki sifat mekanika dan perilaku akustik yang baik (Asdrubali *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2020).

Selain itu, pada struktur sambungan yang terbuat dari kayu LVL memiliki perilaku yang lebih daktail dibandingkan dengan kayu gergajian biasa (Franke & Quenneville, 2014). Berbagai macam produk kayu rekayasa seperti LVL, *Glued laminated bamboo* (glulam), *cross laminated timber* (CLT), sudah banyak digunakan pada struktur, salah satunya adalah struktur balok lantai (*joist*).

Penggunaan balok tinggi yang merupakan struktur dengan rasio  $d/b$  yang besar memiliki kerentanan terhadap terjadinya gulingan/torsi karena strukturnya yang kurang stabil (Šorf & Jandera, 2020). Oleh karena itu, pemberian elemen tambahan pada balok terutama yang dapat memberikan efek kekangan pada arah lateral biasanya diberikan untuk membatasi pergerakan arah lateral dari balok. Kajian mengenai perilaku balok tinggi kayu belum banyak dilakukan. Penelitian mengenai balok laminasi dengan rasio  $d/b$  yang besar yang dibebani tanpa pengekang lateral sebelumnya telah dilakukan oleh Xiao, *et al* (2014).

Sementara itu, perilaku lentur balok kayu yang diberi kekangan lateral pada bagian tengah bentang juga telah diteliti secara numerik oleh Hu, *et al*, (2017). Studi mengenai perilaku balok tinggi yang diberi pengaku lateral juga pernah di pelajari secara numerik oleh Klasson *et al.*, (2018), dimana adanya ketidaksempurnaan geometrik yang dimodelkan dalam bentuk selip akan memberikan

efek pada besarnya gaya yang bekerja pada pengaku lateral.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian lentur secara eksperimental terhadap balok tinggi LVL yang terbuat dari kayu Sengon, dimana pada kedua ujungnya diberikan tambahan pengaku lateral. Perilaku balok yang diberi kekangan lateral ini kemudian dikaji perilakunya melalui analisis numerik dan diverifikasi dengan hasil pengujian di laboratorium. Kapasitas dari balok LVL Sengon ini juga dihitung menggunakan persamaan yang ada pada SNI 7973:2013.

## Metode

### Desain balok tinggi

Balok tinggi biasanya memiliki rasio antara tinggi dan lebar penampang lebih dari 1, sehingga diperlukan pengekang lateral tambahan pada beberapa titik sepanjang balok untuk menghindari terjadinya rotasi pada balok. Dalam SNI 7973: 2013 tentang Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu, faktor stabilitas balok,  $C_L$ , pada balok tinggi dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 dan 2 (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

$$C_L = \frac{1 + (F_{be}/F_b^*)}{1,9} - \sqrt{\left[ \frac{1 + (F_{be}/F_b^*)}{1,9} \right]^2 - \frac{F_{be}/F_b^*}{0,95}} \quad (1)$$

$$F_{bE} = \frac{1,2 E_{min}}{R_B^2} \quad (2)$$

dimana  $F_b^*$  menunjukkan nilai desain lentur acuan yang telah dikalikan dengan semua faktor kecuali faktor penggunaan rebah, faktor volume, dan faktor stabilitas balok.  $E_{min}$  adalah nilai modulus elastisitas acuan minimum dan  $R_B$  adalah rasio kelangsingan balok.

Untuk balok dengan rasio  $d/b$  antara empat sampai lima, nilai faktor dianggap bernilai satu apabila keseluruhan tepi balok pada sisi tekan ditahan untuk mencegah terjadinya perpindahan pada arah lateral (SNI 7973:2013 pasal 4.4.2). Contoh aplikasi dari pasal ini adalah seperti pada sistem balok yang terhubung secara monolit dengan penutup lantai.

### Kriteria kegagalan material

Beberapa teori yang banyak digunakan untuk menganalisis kegagalan pada material antara lain kriteria kegagalan Tsai-Hill, Tsai-Wu, dan Hoffman, tegangan maksimum, dan regangan maksimum (Sun, 2002; Guindos, 2014; Nali & Carrera, 2012; Sistaninia *et al.*, 2017). Kriteria

kegagalan Tsai-Hill ditunjukkan pada Persamaan 3.a hingga 3.g.

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{22} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{23}^2 < 1 \quad (3.a)$$

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) \quad (3.b)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) \quad (3.c)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) \quad (3.d)$$

$$L = \frac{1}{2\sigma_{12}^2} \quad (3.e)$$

$$M = \frac{1}{2\sigma_{13}^2} \quad (3.f)$$

$$N = \frac{1}{2\sigma_{23}^2} \quad (3.g)$$

dimana  $\sigma$  dan  $\tau$  merupakan nilai tegangan aksial dan tegangan geser pada arah yang sesuai. Material kayu pada umumnya memiliki nilai kuat tekan dan kuat tarik yang berbeda, dimana hal ini belum bisa diakomodir oleh kriteria kegagalan Tsai-Hill.

Teori kegagalan Tsai Hill mampu memprediksi besarnya indeks kegagalan akibat kombinasi tegangan yang terjadi pada berbagai arah, namun tidak secara spesifik memperlihatkan mode kegagalan yang terjadi (Albostami *et al.*, 2019). Teori kegagalan material lainnya yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kapasitas struktur adalah teori regangan maksimum. Suatu material dikatakan gagal apabila regangan pada salah satu sumbunya melebihi regangan ultimit dari material, yang secara matematis dituliskan dalam Persamaan 4.a hingga 4.c. (Kaw, 2006).

$$-(\varepsilon_1^c)_{ult} < \varepsilon_1 < (\varepsilon_1^T)_{ult} \quad (4.a)$$

$$-(\varepsilon_2^c)_{ult} < \varepsilon_2 < (\varepsilon_2^T)_{ult} \quad (4.b)$$

$$-(\gamma_{12})_{ult} < \gamma_{12} < (\gamma_{12})_{ult} \quad (4.c)$$

### Set-up pengujian

Dalam penelitian ini, balok tinggi LVL terbuat dari kayu Sengon (*Paraserianthes Falctaria*). Material Kayu Sengon sebagai bahan dasar untuk pembuatan LVL mudah ditemui di Indonesia. LVL Sengon memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan kayu Sengon gergajian, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai jembatan (Herbudiman, *et al.* 2018), kuda-kuda (Ma'ai *et al.*,

2014) dan dinding geser (Awaludin *et al.*, 2013; Awaludin *et al.*, 2018; Hadi 2014). Seperti material kayu pada umumnya, LVL Sengon memiliki sifat mekanik tarik dan tekan yang berbeda, seperti disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik LVL Sengon

No	Sifat Mekanik	Tarik (MPa)	Tekan (MPa)
1.	Modulus elastisitas	7083 *	2253 *
2.	Kuat tarik/tekan sejajar serat	46,69 *	4,03 **
3.	Kuat tarik/tekan tegak lurus serat	22,82 **	5,40 **
4.	Kuat lentur		38,78 **
5.	Kuat geser sejajar serat		3,05 ****
6.	Kuat geser tegak lurus serat		3,22 ****

\* (Awaludin, *et al.*, 2019)

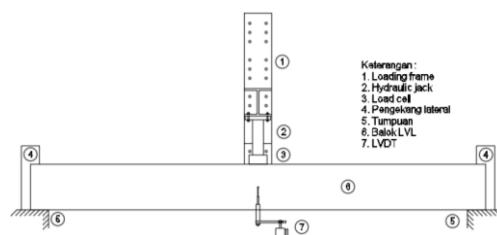
\*\* (Awaludin *et al.*, 2018)

\*\*\* (Awaludin, 2011)-

\*\*\*\* Data R&D internal PT SGS

Pengujian lentur 3 titik pada benda uji dilakukan untuk mengetahui kapasitas ultimit dari balok LVL. Balok LVL yang digunakan terbuat dari 25 lapis *veneer* kayu Sengon dengan ketebalan sekitar 2mm, yang direkatkan menggunakan urea formadehyde, dan merupakan produksi dari PT. Sumber Graha Sejahtera. Balok uji memiliki kadar air sebesar 16% dengan kepadatan sebesar 381 kg/m<sup>3</sup>. Adapun *set-up* pengujian dapat dilihat pada Gambar 1.

Balok LVL dengan panjang 2500 mm, lebar 50 mm, dan tinggi 250 mm diletakkan pada dua buah tumpuan sederhana dengan jarak bersih antar tumpuan sebesar 2400 mm. Selanjutnya, kekangan pada arah lateral diberikan pada daerah dengan menambahkan baja profil kanal untuk menghindari terjadinya rotasi pada balok. Beban dari *hydraulic jack* disalurkan ke balok LVL melalui besi pembeban. Besarnya beban yang diberikan diukur melalui *load-cell*, sedangkan lendutan yang terjadi pada tengah bentang diukur secara kontinyu menggunakan *Linear Variabel Differential Transducer* (LVDT) yang dipasang pada sisi kanan dan sisi kiri balok uji.



Gambar 1. Set-up pengujian

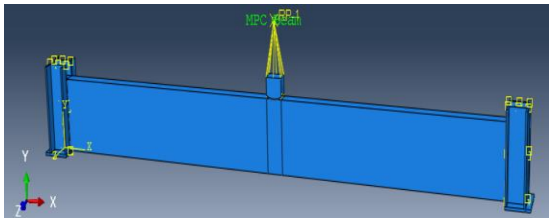
### Analisa numerik

Pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ABAQUS. Perangkat lunak ini juga sudah banyak digunakan oleh peneliti lainnya untuk memodelkan struktur kayu, baik itu kayu gergajian (Khelifa *et al.*, 2015; Khelifa & Celzard, 2014; Navaratnam *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2018) maupun kayu rekayasa (Aicher & Tapia, 2018; Sistaninia *et al.*, 2017). Dalam model numerik yang dibuat, balok LVL dimodelkan sebagai elemen 3 dimensi, dimana hubungan tegangan-regangannya disajikan pada Persamaan 5 (Suhendro, 2000).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

dimana  $E$  adalah modulus elastisitas, sedangkan  $\nu$  adalah rasio Poisson.

Meskipun memiliki sifat mekanik tarik dan tekan yang berbeda, model numerik dibuat dengan lebih sederhana dengan menggunakan satu nilai modulus elastisitas saja, yaitu rerata dari modulus elastisitas tarik dan tekan. Balok memiliki dimensi penampang  $250 \times 50 \text{ mm}^2$  dengan panjang bersih bentang adalah 2400 mm. Selanjutnya, ujung-ujung balok menumpu pada pelat besi yang telah diberi kekangan lateral. Terdapat celah sebesar 1mm diantara balok LVL Sengon dengan baja profil kanal yang berfungsi sebagai pengekang lateral. Dalam aplikasinya di lapangan, celah ini dimungkinkan terjadi akibat adanya ketidaksempurnaan geometrik kayu. Secara lebih rinci, model numerik disajikan dalam Gambar 2.

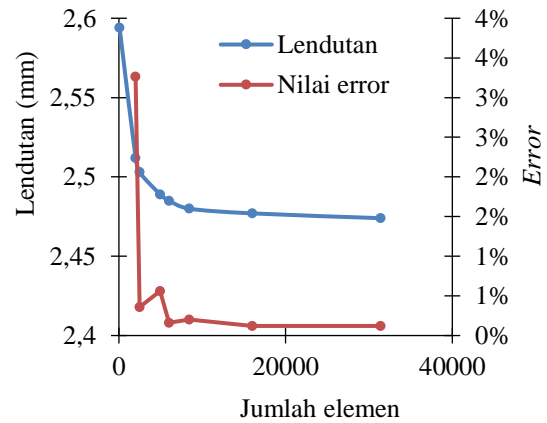


Gambar 2. Model numerik

Beban diberikan melalui pembebanan yang terletak diatas balok. Adapun pembebanan dijalankan dengan protokol *load-control*. Studi konvergensi dilakukan untuk mendapatkan ukuran *mesh* yang sesuai, yang mana hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil studi konvergensi menunjukkan bahwa hasil studi konvergensi menunjukkan bahwa ukuran *mesh* maksimum 12,5 mm (jumlah mesh sebanyak 16.000 elemen) telah memberikan hasil

yang konvergen, dengan nilai *error* paling kecil sebesar 0,12%. Hasil analisis berupa nilai tegangan, regangan, serta lendutan yang terjadi pada balok dievaluasi. Kriteria kegagalan Tsai-Hill dan regangan maksimal diterapkan pada model untuk mengetahui beban ultimit yang menyebabkan keruntuhan pada struktur balok. Model dibuat dalam dua variasi, dimana model pertama merupakan model balok dengan tumpuan lateral hanya pada ujungnya saja, sedangkan model kedua merupakan balok yang diberi tumpuan lateral pada daerah tumpuan serta pada sepanjang sisi atas balok LVL.



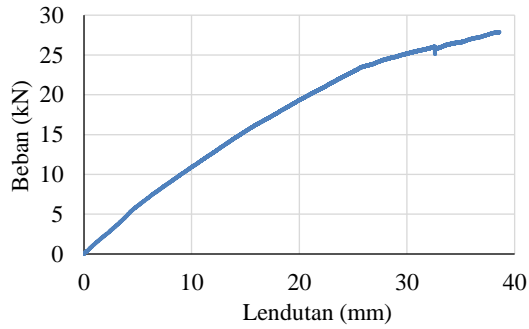
Gambar 3. Hasil studi konvergensi

## Hasil dan Pembahasan

### Hasil pengujian

Hasil pengujian lentur yang dilakukan terhadap balok LVL Sengon disajikan dalam Gambar 4 (a). Beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok adalah 27,88 kN, dengan lendutan maksimal sebesar 38,59 mm. Lendutan yang diukur dalam pengujian merupakan lendutan vertikal pada titik yang terletak di setengah tinggi balok. Adapun kondisi balok setelah mencapai beban ultimitnya ditunjukkan pada Gambar 4 (a). Gambar 4 (b) menunjukkan bahwa sisi atas balok telah mengalami kegagalan tekan, dan sisi bawah balok mengalami kegagalan tarik. Pola patahan pada lembaran *veneer* penyusun LVL menunjukkan bahwa tegangan tarik yang terjadi telah melampaui tegangan tarik ultimit dari LVL Sengon.

Dari pengujian lentur, balok LVL Sengon yang diuji memiliki nilai modulus elastisitas lentur sebesar 4641 MPa. Sementara itu, nilai kuat lentur dari balok yang diuji mencapai 32,13 MPa. Jika dibandingkan hasil penelitian sebelumnya seperti yang disajikan pada Tabel 1, maka balok LVL Sengon ini memiliki nilai kuat lentur yang sedikit lebih rendah, dengan selisih sebesar 17,16%.



(a)



(b)

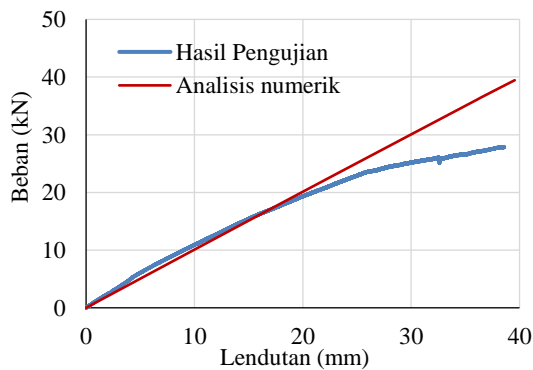
**Gambar 4. Pengujian Kurva beban lendutan hasil pengujian (a) dan pola patahan kerusakan balok LVL (b)**

### Hasil perhitungan kapasitas penampang berdasarkan SNI 7973:2013

Faktor stabilitas balok menjadi parameter penting yang perlu diperhitungkan pada saat menghitung kapasitas balok, terutama pada balok dengan rasio  $d/b$  yang tinggi. Pada balok LVL yang diuji, dimana balok hanya diberi pengekang pada kedua tumpuannya saja, didapatkan nilai  $C_L$  sebesar 0,9856. Perhitungan kapasitas penampang menggunakan persamaan yang ada di SNI 7973:2013 memberikan nilai beban ultimit sebesar 33,42 kN.

### Hasil analisa numerik

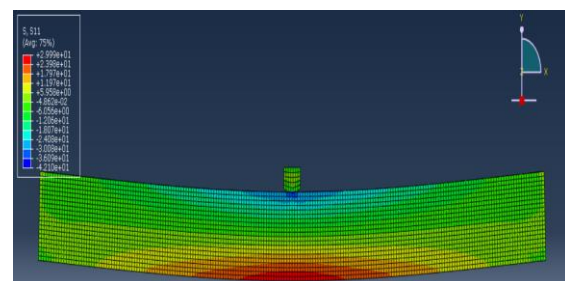
Kurva beban-lendutan yang didapatkan dari pengujian di laboratorium digunakan untuk memverifikasi model numerik yang dibuat. Dalam analisis numerik, material LVL Sengon diasumsikan berperilaku elastis dan linier. Meskipun hasil pengujian di laboratorium menunjukkan adanya perilaku non-linier dari balok saat pengujian lentur, kurva beban-lendutan yang didapatkan dari analisis numerik memberikan hasil yang cukup dekat dengan kurva yang didapatkan dari pengujian di laboratorium, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5. Perbandingan kurva beban lendutan hasil pengujian dan analisis numerik**

Selain itu, ditemukan adanya deformasi lateral maksimal pada saat beban mencapai nilai 27,88 kN sebesar 0,12 mm di tengah bentang. Deformasi lateral pada area tumpuan juga sangat kecil, lebih kecil jika dibandingkan dengan celah yang diberikan antara balok dan pengekang lateral (1 mm). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa pengekang lateral belum bekerja meskipun beban puncak balok sudah terlampaui.

Distribusi tegangan tegangan aksial ( $\sigma_{11}$ ) pada balok saat mengalami beban sebesar beban puncak (27,88 kN) ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat, bahwa tegangan aksial tekan terjadi pada sisi atas balok, sedangkan tegangan aksial tarik terjadi pada sisi bawah balok. Pada serat terbawah, tegangan yang terjadi hanya didominasi oleh  $\sigma_{11}$  saja. Namun demikian, pada serat paling atas balok, terjadi kombinasi tegangan baik  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ , maupun  $\sigma_{33}$  (lihat Gambar 7).

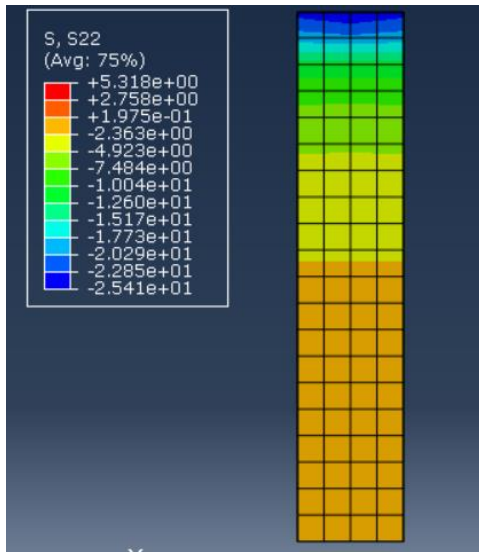


**Gambar 6. Distribusi tegangan aksial ( $\sigma_{11}$ ) pada balok (dalam satuan MPa)**

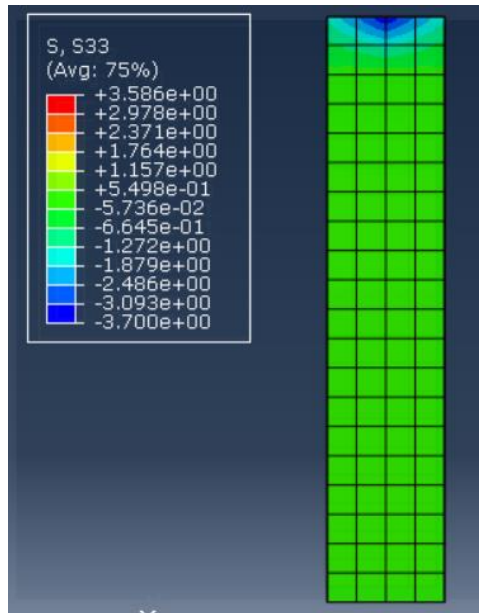
Tegangan tekan pada ketiga arah terbesar terjadi pada serat paling atas balok. Kapasitas dari elemen struktur dievaluasi melalui kriteria kegagalan Tsai-Hill dan regangan maksimum, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (8.a), dan (8.b).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b), terjadi fenomena densifikasi plastis pada sisi bagian atas balok yang terlihat dari adanya pemampatan pada bagian ini. Densifikasi ini

umumnya terjadi setelah material kayu mengalami tegangan tekan melampaui batas leleh dari kuat tekannya (Huang *et al.*, 2020). Pada kasus ini, balok tidak akan mengalami kegagalan struktur secara tiba-tiba meskipun tegangan tekan ultimitnya telah tercapai.



(a)



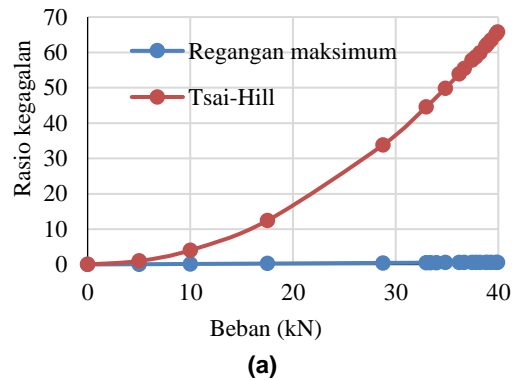
(b)

**Gambar 7. Distribusi tegangan pada penampang balok sisi bagian tengah:**  
(a). tegangan  $\sigma_{22}$ , (b) tegangan  $\sigma_{33}$

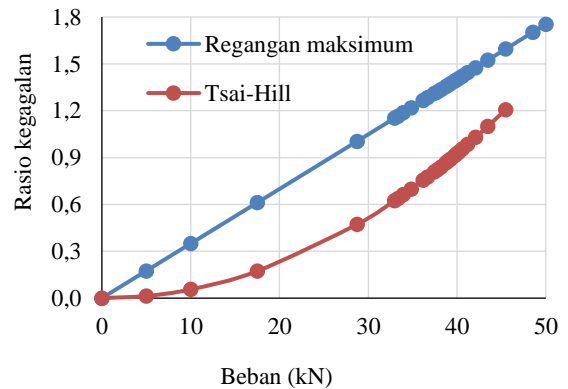
Gambar 8 (a) menunjukkan hasil perhitungan rasio kegagalan pada sisi atas balok LVL yang dihitung menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Hill dan kriteria regangan maksimum. Perhitungan menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Hill menunjukkan bahwa sisi atas balok akan gagal setelah dikenai beban sebesar 3,6 kN. Hal ini

berbeda jauh dengan hasil yang didapatkan pada kriteria regangan maksimum, dimana pada nilai beban lebih dari 40 kN, rasio kegagalannya belum mencapai nilai 1. Hal ini wajar, karena pada kriteria Tsai-Hill kombinasi antara tegangan aksial tekan dengan tegangan pada arah tegak lurus beban diperhitungkan secara simultan, sehingga menghasilkan nilai indeks/rasio kegagalan yang tinggi. Sementara itu, pada kriteria regangan maksimum, hanya diperhitungkan regangan pada arah aksialnya saja.

Pada sisi LVL bagian bawah, tegangan yang terjadi lebih didominasi oleh tegangan aksial tarik. Kegagalan akibat tarik ini bersifat getas. Dengan demikian, jika tegangan tarik ultimit dari material LVL tercapai, serat dari *veneer* penyusun akan patah dan terjadi kegagalan struktur. Namun demikian, dari hasil pemodelan, diketahui bahwa pada saat beban puncak tercapai (27,88 kN), rasio tegangan pada struktur belum mencapai nilai 1 (lihat Gambar 8. (b)). Hasil analisa numerik menunjukkan bahwa kegagalan struktur akan terjadi pada beban 41,38 kN (jika dievaluasi dengan kriteria kegagalan Tsai-Hill) dan 28,58 kN (apabila dievaluasi dengan kriteria kegagalan regangan maksimal).



(a)



(b)

**Gambar 8. Rasio kegagalan balok LVL:**  
(a). pada serat atas balok,  
(b). pada serat bawah balok

### Perbandingan antara hasil pengujian dengan hasil perhitungan berdasarkan SNI dan analisa numerik

Tabel 2 menunjukkan perbandingan nilai beban ultimit dari balok kayu Sengon LVL yang didapatkan dari berbagai metode. Hasil perhitungan menggunakan persamaan yang ada pada SNI 7973:2013 memberikan selisih sebesar 19,89% terhadap sampel yang diuji di laboratorium. Selanjutnya, hasil analisis numerik juga dievaluasi menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Hill dan regangan maksimum untuk mendapatkan nilai kapasitas dari balok. Kriteria kegagalan Tsai-Hill memberikan nilai kapasitas 52,01% lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian di lapangan, sedangkan, kriteria kegagalan regangan maksimum memberikan nilai selisih sebesar 2,52% terhadap hasil pengujian di laboratorium.

**Tabel 2. Perbandingan nilai beban ultimit**

	Beban ultimit (kN)	Selisih terhadap hasil pengujian (%)
Hasil Pengujian	27,88	
SNI 7973:2013	33,42	19,89
Analisis Numerik (Tsai-Hill)	41,38	52,01
Analisis Numerik (Regangan maksimum)	28,58	2,52

Dari dua kriteria kegagalan yang ditinjau, kriteria regangan maksimum memberikan nilai selisih yang lebih kecil dibandingkan dengan kriteria Tsai-Hill. Pada kriteria kegagalan regangan maksimum, balok LVL mengalami kegagalan akibat regangan pada serat terluar sisi bawah balok telah mencapai regangan utimitnya. Hal ini selaras dengan hasil pengujian di laboratorium dimana serat *veneer* pada sisi bawah balok LVL patah pada saat beban puncak tercapai. Kriteria regangan maksimum dinilai cukup sesuai untuk mengevaluasi kapasitas struktur karena kegagalan balok LVL sangat ditentukan oleh putusanya *veneer* terbawah balok, sementara pada area ini tegangan dan regangan yang terjadi didominasi oleh tegangan dan regangan arah aksial.

### Studi parametrik

Dalam SNI 7973: 2013, adanya kemungkinan terjadinya rotasi pada balok dengan ukuran tinggi yang lebih besar dibandingkan dengan lebarnya diantisipasi dengan memberikan nilai reduksi sebesar  $C_L$  pada balok. Faktor  $C_L$  kemudian dapat bernilai 1,0 apabila struktur diberikan tambahan pengekang lateral sesuai dengan yang disyaratkan

pada pasal 4.4.1. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan studi parametrik untuk mengetahui perbandingan kapasitas balok yang diberi pengekang hanya pada ujungnya dengan yang diberi pengekang sesuai dengan ketentuan pada pasal 4.4.1 SNI 7973:2013. Tabel 3 menunjukkan hasil dari studi parameterik yang dilakukan. Balok yang dikekang hanya pada ujungnya memiliki kapasitas beban sebesar 28,58 kN, sedangkan balok yang dikekang pada keseluruhan sisi tekannya memiliki kapasitas sebesar 28,61 kN. Besarnya rasio kapasitas dari balok yang dikekang hanya pada tumpuannya dengan balok yang dikekang pada sisi tekan serta tumpuannya adalah sebesar 0,9989. Nilai ini cukup dekat dengan nilai  $C_L$  untuk balok yang dikekang hanya pada sisi tumpuannya, dengan nilai error sebesar 1,3%.

**Tabel 3. Hasil studi parametrik**

Posisi kekangan lateral pada balok	Beban ultimit (kN)	$C_L$
Tumpuan	28,58	0,9856
Sepanjang sisi tekan balok dan pada tumpuan	28,61	1,0000

### Kesimpulan

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian lentur tiga titik pada sampel balok LVL Sengon berukuran 250 mm × 50 mm × 2500 mm yang diberi pengekang lateral pada sisi tumpuannya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beban ultimit yang dapat ditahan oleh balok adalah sebesar 27,88 kN. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan yang ada di SNI 7973:2013, didapatkan nilai kapasitas ultimit sebesar 33,42 kN. Sementara itu, kapasitas beban ultimit yang didapatkan menggunakan kriteria kegagalan Tsai-Hill adalah 41,38 kN dan 28,58 kN apabila dievaluasi menggunakan kriteria regangan maksimum.

Penerapan kriteria regangan maksimum untuk mendapatkan kapasitas ultimit struktur memberikan nilai *error* yang paling kecil dan lebih sesuai digunakan pada struktur ini. Selain itu, penggunaan kriteria ini dapat memprediksi mode kegagalan yang terjadi pada struktur. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan penambahan jumlah benda uji serta variasi dimensi balok uji LVL sengon untuk mendapatkan gambaran yang lebih menyeluruh terkait dengan perilaku lentur balok tinggi.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Sumber Graha Sejahtera yang telah menyediakan material LVL Sengon dalam penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Aicher, S., & Tapia, C. (2018). Novel internally LVL-reinforced glued laminated timber beams with large holes. *Construction and Building Materials*, *169*, 662 – 677.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.178>
- Albostami, A. S., Wu, Z., & Cunningham, L. S. (2019). Assessment of cross-laminated timber panels by the state-space approach. *Advances in Structural Engineering*, *22*(11), 2375–2391.  
<https://doi.org/10.1177/1369433219841504>
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, *114*, 307–332.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- Awaludin, A. (2011). *Hasil Pengujian LVL Paraserianthes falctaria (Sengon)*, 1-18.  
<https://doi.org/10.47655/dialog.v42i1.325>
- 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*, 1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00225>
- Awaludin, A., Pribadi, A., & Satyarno, I. (2013). Racking Resistance of Paraserianthes Falctaria Wooden Panel Under Monotonic Load. *Proceeding of the 6th Civil Engineering Conference in Asia Region : Embracing the Future through Sustainability*, August 2013. Bandung.
- Awaludin, A., Shahidan, S., Basuki, A., Zuki, S. S. M., & Nazri, F. M. (2018). Laminated Veneer Lumber (LVL) Sengon: An innovative sustainable building material in Indonesia. *International Journal of Integrated Engineering*, *10*(1), 17 – 22.  
<https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.01.003>
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 7973-2013 Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu*. In Jakarta. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Franke, B., & Quenneville, P. (2014). Analysis of the fracture behavior of radiata pine timber and laminated veneer lumber. *Engineering Fracture Mechanics*, *116*, 1 – 12.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.12.004>
- Guindos, P. (2014). Comparison of different failure approaches in knotty wood. *Drewno*, *57*(193), 51 – 68.  
<https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.065.03>
- Hadi, M. (2014). Perilaku statik dan dinamik dindinggeser rangka laminated veneer lumber dengan panel fiber cement board. *Jurnal Peremukiman*, *9*(3), 136 – 147.
- Herbudiman, B., Pranata, Y. A., & Pangestu, L. (2018). Design of pedestrian truss bridge with Sengon-Rubber laminated veneer lumber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *109*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012029>
- Hu, Y., Mohareb, M., & Doudak, G. (2017). Lateral torsional buckling of wooden beams with midspan lateral bracing offset from section midheight. *Journal of Engineering Mechanics*, *143*(11), 04017134.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001359](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001359)
- Huang, C., Gong, M., Chui, Y., & Chan, F. (2020). Mechanical behaviour of wood compressed in radial direction-part I. New method of determining the yield stress of wood on the stress-strain curve. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *5*(3), 186–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.004>
- Kaw, A. K. (2006). Mechanics of Composite Materials. In *Micromechanics of Composite Materials* (2nd ed.).  
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-05224-9>
- Khelifa, M., Auchet, S., Méausoone, P. J., & Celzard, A. (2015). Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with carbon fibre-reinforced polymers. *Engineering Structures*, *101*, 364–375.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>
- Khelifa, M., & Celzard, A. (2014). Numerical analysis of flexural strengthening of timber beams reinforced with CFRP strips. *Composite Structures*, *111*(1), 393–400.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>
- Klasson, A., Crocetti, R., Björnsson, I., & Frühwald Hansson, E. (2018). Design for lateral stability of slender timber beams considering slip in the lateral bracing system. *Structures*, *16*, 157 – 163.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.007>
- Liu, Y., Guo, H., Sun, C., & Chang, W. S. (2016). Assessing cross laminated timber (CLT) as an alternative material for mid-rise residential buildings in cold regions in China-A life-cycle



- assessment approach. *Sustainability (Switzerland)*, 8(10).  
<https://doi.org/10.3390/su8101047>
- Ma'ai, M. R., Basuki, A., & Sunarmasto. (2014). Analisis perilaku prototip struktur rangka kuda-kuda laminated veneer lumber ( LVL ) kayu sengon. *Matriks Teknik Sipil*, 2(1), 40–47.
- Nali, P., & Carrera, E. (2012). A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 280–289.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.018>
- Navaratnam, S., Herath, N., Lokuge, W., Thamboo, J., & Poologanathan, K. (2021). Performance of timber girders with end-notch: Experimental and numerical investigation. *Structures*, 29, 730 – 740.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.075>
- Oka, G. (2009). Analisis rasio antara lebar dan tinggi balok terhadap perilaku lentur kayu kamper. *Smartek*, 7(1), 24 – 31.
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., & Strykowski, W. (2014). Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction and Building Materials*, 52, 428–436.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.066>
- Sistaninia, M., Hudert, M., Humbert, L., & Weinand, Y. (2017). Experimental and numerical study of the structural behavior of a single timber textile module. *Advanced Timber Structures: Architectural Designs and Digital Dimensioning*, 46, 134 – 147.
- Šorf, M., & Jandera, M. (2020). Lateral-torsional buckling of slender cross-section stainless steel beams. *Structures*, 28, 1466 – 1478.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.073>
- Suhendro, B. (2000). *Metode elemen hingga dan aplikasinya*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan UGM.
- Sun, C. T., Tao, J., Kaddour, A. S. (2004). The Prediction of Failure Envelops and Stress/Strain Behavior of Composite Laminates: Comparison with Experimental Results. In *Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites*. 890-902.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-080-44475-8.X5000-8>
- Sun, X., He, M., & Li, Z. (2020). Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 249(1239), 118751.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>
- Tran, T. T., Thi, V. D., Khelifa, M., Oudjene, M., & Rogaume, Y. (2018). A constitutive numerical modelling of hybrid-based timber beams with partial composite action. *Construction and Building Materials*, 178, 462–472.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.080>
- Xiao, Q., Doudak, G., & Mohareb, M. (2014). Lateral torsional buckling of wood beams: Fea-modelling and sensitivity analysis. *WCTE 2014 - World Conference on Timber Engineering, Proceedings*, 90–91.