

No	Tanggal	Keterangan
1	12 September 2019	Penulis korespondensi mengirimkan naskah publikasi ke redaksi.
2	18 September 2019	Redaksi memberikan hasil review, penulis diminta memperbaiki.
	18 September 2019	Penulis mengirimkan naskah yang sudah direvisi (Revisi ke-1).
3	3 Desember 2019	Redaksi memberikan hasil review yaitu Diterima dengan Revisi .
	3 Desember 2019	Penulis mengirimkan naskah yang sudah direvisi (Revisi ke-2).
4	2 Juli 2020	Redaksi memberikan Keputusan: Accepted (Diterima)
	2 Juli 2020	Naskah memasuki proses editing.
5	2 Juli 2020	Naskah terbit pada Volume 15 Nomor 1 Tahun 2020 .

Alur Kerja

Publikasi

Naskah

Ulasan

Copyediting

Produksi

File Naskah

Q Cari

▶	 1081	meydinafa, Journal manager, JurnalPermukiman_YSF_revisi2.doc	12 September 2019	Naskah
---	--	--	-------------------------	--------

Unduh Semua File

Alur Kerja

Publikasi

Naskah

Ulasan

Copyediting

Produksi

Ronde 1

Lampiran Reviewer

Q Cari

 1086	Journal manager, #304 Form Pemeriksaan 2019_1a Modul Penampang Elastik.pdf	18 September 2019	Naskah
--	--	-------------------------	--------

Revisi

Q Cari

Unggah File

▶	 1161	Journal manager, JurnalPermukiman_YSF_Revisi2.doc	3 December 2019	Naskah
---	--	---	-----------------------	--------

Partisipan [Edit](#)

Aris Prihandono (aris)

Dr. Yosafat Aji Pranata (yosafat)

Pesan

Rekam	Dari
<p>The following message is being delivered on behalf of ONLINE JURNAL PERMUKIMAN.</p> <hr/> <p>Dr. Yosafat Aji Pranata:</p> <p>We have reached a decision regarding your submission to Jurnal Permukiman, "Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Jabon Glulam".</p> <p>Our decision is: Revisions Required</p> <p>Aris Prihandono (Bidang Tata Ruang dan Kawasan) Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Badan Litbang Kementerian PUPR jurnal@puskim.pu.go.id</p> <hr/> <p>http://jurnalpermukiman.pu.go.id</p>	<p>yosafat 09/18/2019 14:01</p>
<p>► The following message is being delivered on behalf of ONLINE JURNAL PERMUKIMAN.</p> <hr/> <p>Yth. Dr. Yosafat Aji Pranata:</p> <p>Beserta ini kami sampaikan hasil pemeriksaan naskah berjudul, "Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Jabon Glulam".</p> <p>Keputusan redaksi : Accept Submission (Diterima)</p> <p>an. Redaksi Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian PUPR jurnal@puskim.pu.go.id</p> <hr/> <p>http://jurnalpermukiman.pu.go.id</p>	<p>yosafat 07/02/2020 16:11</p>

[JurnalPermukiman]Hasil Pemeriksaan Naskah #304 >



Sekretariat Redaksi Jurnal Permukiman <jurnal@puskim.pu.go.id>
to me ▾

Thu, Jul 2, 2020, 4:09 PM



Translate to English ✕

The following message is being delivered on behalf of ONLINE JURNAL **PERMUKIMAN**.

Yth. Dr. Yosafat Aji Pranata:

Beserta ini kami sampaikan hasil pemeriksaan naskah berjudul, "Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Jabon Glulam".

Keputusan redaksi : Accept Submission (Diterima)

an. Redaksi Pusat Litbang Perumahan dan **Permukiman**, Kementerian PUPR
jurnal@puskim.pu.go.id

<http://jurnalpermukiman.pu.go.id>

↩ Reply

➦ Forward



MODULUS PENAMPANG ELASTIK BALOK KAYU JABON GLULAM

Elastic Section Modulus of Glulam Jabon Timber Beams

Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto, Aan Darmawan

Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Suria Sumantri 65 Bandung, 40164, Jawa Barat

Surel: yosafat.ap@gmail.com, anang.kristianto@gmail.com, valfa007@gmail.com

Diterima: 03 Desember 2019 ; Disetujui: 12 Maret 2020

Abstrak

*Modulus penampang elastik balok merupakan salah satu parameter yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan balok, secara khusus berhubungan dengan momen inersia penampang. Modulus penampang elastik balok kayu utuh (solid) tidak sama dengan balok kayu laminasi untuk studi kasus balok dengan ukuran penampang sama, hal ini dikarenakan momen inersia penampang balok laminasi perhitungannya berbeda dengan balok utuh akibat adanya slip antar lamina pada saat beban bekerja serta besarnya modulus elastisitas yang tidak sama pada setiap lamina, sehingga perilaku lentur balok menjadi satu kesatuan dalam kaitannya dengan kekuatan balok. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari modulus penampang elastik balok kayu laminasi lem (glulam). Ruang lingkup penelitian yaitu benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.) ukuran penampang 60x160 mm, jumlah lamina 4 (empat), sistem laminasi menggunakan lem super adhesive, pengujian lentur menggunakan metode four-point loading test, perilaku lentur yang ditinjau adalah kekuatan lentur, modulus penampang elastik, dan rasio daktilitas balok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa modulus penampang elastik dan tegangan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh dengan rasio sebesar 0,54, serta rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28 sehingga termasuk dalam kriteria daktilitas terbatas. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur. Parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan serviceability.*

Kata Kunci: Rigiditas lentur, balok, laminasi, lem, jabon

Abstract

*The elastic cross-section modulus of the beam is one of the parameters related to the strength and stiffness of the beam, specifically related to the inertia moment of the cross-section. The elastic cross-section modulus of solid timber beam is not the same as laminated timber beam for the case study of beam with the same cross-section size, this is because the inertia moment of cross-section of the laminated beam calculation is different from the solid beam due to slippage between lamina when the load is working and the magnitude of the elastic modulus which is not the same in every lamina, so that the flexural behavior of the beam becomes a single unit in relation to the strength of the beam. The purpose of this study was to study the elastic cross-section modulus of glue-laminated wood (glulam). The scope of the study is the beam test object made of Jabon wood (*Anthocephalus cadamba* Miq.) 60x160 mm cross-section size, 4 (four) lamina numbers, lamination system using super adhesive glue, flexural testing using the four-point loading test method, the flexural behavior that is review are flexural strength, elastic cross-section modulus, and beam ductility ratio. The results showed that the elastic cross-section modulus and the flexural stress of the laminated timber beams were lower than the solid timber beams with a ratio of 0.54, and the ductility ratio of the laminated wooden beams was 1.28 so that they were categorized in the limited ductility criteria. The test results indicate that the failure of glue-laminated timber beams is a failure of bending. The elastic modulus cross-section parameters of laminated timber beams are useful for the design of beam structure components in buildings, especially in the calculation of beam strength and beam stiffness as a serviceability requirement.*

Keywords: Flexural rigidity, beam, laminated, glue, jabon

PENDAHULUAN

Balok laminasi lem atau Glulam (*glue-laminated*) merupakan balok yang disusun dari dua atau lebih lamina kayu dan dirangkai secara vertikal, horisontal, atau kombinasi silang, sehingga didapatkan penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan. Sistem laminasi bermanfaat untuk mengatasi permasalahan keterbatasan dimensi bahan kayu yang ada. Sistem perekatan dilakukan dengan menggunakan lem yang telah diuji kekuatan gesernya sehingga slip antar lamina kayu dapat direduksi seminimal mungkin.

Salah satu manfaat balok laminasi adalah dapat menghasilkan ukuran penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan dari dua atau lebih lamina-lamina kayu, sebagai contoh balok kayu ukuran penampang 60 mm x 40 mm apabila disusun sebanyak empat lamina maka akan menghasilkan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Masing-masing lamina tersebut direkatkan menggunakan perekat/lem.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan pengujian lentur balok kayu laminasi lem (*glulam*) untuk mendapatkan data empiris parameter modulus penampang elastik.

Parameter modulus penampang elastik diperlukan khususnya untuk perhitungan kekuatan lentur (F_b) balok dengan penampang tidak solid, sebagai contoh balok laminasi. Kekuatan lentur merupakan salah satu parameter utama terkait analisis dan desain balok (komponen struktur lentur) pada bangunan gedung.

Perkembangan penelitian balok kayu laminasi lem (*glulam*) sudah sangat pesat. Dimulai dari penelitian untuk mempelajari perilaku lentur balok, penelitian terkait rigiditas balok, penelitian variasi jenis kayu, penelitian variasi sistem laminasi yang digunakan, penelitian terkait usulan metode-metode perkuatan untuk meningkatkan kinerja lentur, sampai dengan penelitian untuk mengetahui kinerja dan perilaku lentur akibat beban jangka panjang.

Penelitian sebelumnya terkait perilaku dan kekuatan lentur balok kayu laminasi telah dilakukan oleh Kamiya (1985), Bohnhoff et al. (1989), dan Gliniorz, Mosalam, dan Natterer (2002), dengan hasil secara umum kekuatan lentur lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh.

Penelitian terkait perbandingan kekuatan lentur balok kayu utuh dan balok kayu laminasi lem telah dilakukan oleh Ezeagu et al. (2015) untuk kayu jenis daun jarum (*softwood*). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu

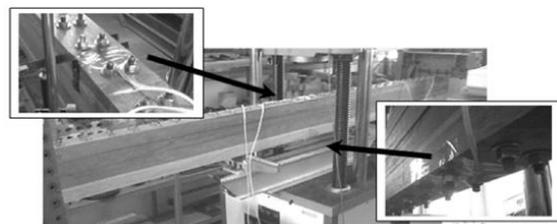
laminasi lem lebih rendah berkisar 37%-66% dibandingkan dengan kayu utuh. Dari segi manfaat, kayu laminasi lem memberikan manfaat dimensi dan ukuran penampang yang lebih besar.



Gambar 1 Pengujian Balok Kayu Laminasi oleh (Ezeagu et al. 2015)

Penelitian kekuatan lentur balok laminasi lem dengan pendekatan analitis dan numerik telah dilakukan oleh Muhammed dan Arya (2015), balok menggunakan sistem laminasi horizontal dengan variasi ketebalan lamina yang berbeda-beda. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ketebalan lamina tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lentur balok laminasi.

Penelitian terkait rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro (2011; 2012) yaitu sistem laminasi mekanik menggunakan alat sambung baut. Penelitian dilakukan terhadap 6 (*enam*) jenis kayu Indonesia. Hasil penelitian secara umum memperlihatkan bahwa rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi-baut berkisar antara 0,38-0,91. Rasio modulus penampang elastik (S) balok laminasi mekanik dapat mencapai kondisi rasio 0,91 terhadap balok utuh, hal ini dapat tercapai dengan spasi antar baut 100 mm, sehingga pada saat balok dibebani lentur, slip yang terjadi antar lamina dapat berkurang, sehingga momen inersia penampang balok laminasi mendekati momen inersia penampang balok utuh.



Gambar 2 Penelitian Terkait Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi Mekanis (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012)

Penelitian kekuatan lentur sistem laminasi-baut dengan orientasi arah laminasi vertikal juga telah dilakukan oleh Pranata dan Suryoatmono (2019). Tujuan orientasi sistem lamina pada arah vertikal

adalah untuk mendapatkan dimensi lebar (*b*) yang lebih besar dan bermanfaat sebagai sistem struktur lantai (*slab*) bangunan bertingkat. Hasil penelitian membahas tentang kekuatan lentur sistem laminasi akibat beban gravitasi dan perilaku struktur lantai akibat beban getaran.

Penelitian balok laminasi lem (*glulam*) dengan kombinasi lebih dari satu jenis kayu telah dilakukan oleh (Chauf dan Dewi 2016) dengan hasil penelitian adalah diperoleh model struktur laminasi yang efisien dan kekuatan lentur yang optimal dengan tipe kegagalan yaitu getas.

Penelitian perilaku lentur balok laminasi lem akibat beban jangka panjang (*long-term behavior*) telah dipelajari oleh Massaro dan Malo (2019) untuk jenis kayu *Norway Spruce*. Penelitian dilakukan dengan pendekatan pengujian eksperimental dan analisis numerik.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi eksperimental di laboratorium. Secara umum tahapan penelitian terdiri dari 4 (empat) tahap, yaitu tahap pertama studi literatur terkait modulus elastisitas balok kayu, rigiditas lentur balok kayu, kayu laminasi lem, serta tata cara pengujian lentur kayu berdasarkan ASTM. tahap kedua yaitu pembuatan benda uji balok kayu laminasi lem. Tahap ketiga adalah pengujian eksperimental di laboratorium. Tahap keempat adalah proses mengolah data kurva kapasitas lentur balok yaitu kurva hubungan beban versus peralihan menjadi parameter rigiditas lentur balok kayu laminasi, kekuatan lentur balok kayu laminasi, dan rasio daktilitas peralihan balok.

Ruang lingkup penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.).
2. jumlah lamina 4 (empat), dengan ukuran masing-masing lamina adalah 60 mm x 40 mm, sehingga membentuk ukuran penampang balok 60 mm x 160 mm.
3. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* yaitu Jenis *Strong Epoxy*.
4. Metode perekatan adalah metode *press* pada sistem laminasi kayu dengan menggunakan dudukan pelat dan alat pengencang baut, teknik pengencangan baut menggunakan metode *snug tight* sesuai AISC 360-16 (AISC 2016).
5. Jumlah benda uji adalah 3 (tiga) buah benda uji balok. Panjang balok (jarak antar tumpuan) adalah 1500 mm.

6. Pengujian lentur mengacu pada standar ASTM D198 (ASTM 2015), dengan metode pengujian destruktif *four-point bending test*.
7. Perilaku lentur yang ditinjau adalah modulus penampang elastik, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok.

Balok Kayu Laminasi Lem (Glulam)

Glulam adalah susunan beberapa lapis kayu direkatkan satu sama lain menjadi satu kesatuan dengan mereduksi kemungkinan terjadinya diskontinuitas atau slip antar lamina. Sistem laminasi merupakan salah satu upaya menghasilkan desain penampang balok kayu yang ekonomis dan memenuhi prinsip struktural.

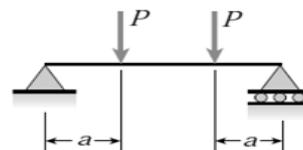
Perekat merupakan material dengan sifat dominan berupa kimiawi. Lamina-lamina kayu yang direkatkan oleh lem akan memungkinkan berdampak pada perubahan sifat mekanis kayu, khususnya kekakuan dan kekuatan lentur. Apabila balok disusun dengan jumlah lamina yang semakin banyak, maka semakin besar pula luas bidang rekatan, sehingga dampaknya berkaitan pula dengan tipe perekat terhadap kinerja kekakuan dan kekuatan.

Deformasi balok

Modulus elastisitas adalah kemiringan proporsional garis linier dari kurva hubungan beban dan deformasi (dalam rentang beban elastik), dalam konteks ini adalah beban lentur pada balok dan deformasi adalah lendutan balok akibat adanya beban yang bekerja. Untuk kondisi balok sederhana dengan beban 2 (dua) buah terpusat pada masing-masing jarak sejauh *a* dari tumpuan masing-masing seperti ilustrasi pada Gambar 3, maka hubungan deformasi terhadap beban dinyatakan dalam Persamaan 1 (Goodno dan Gere 2018).

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

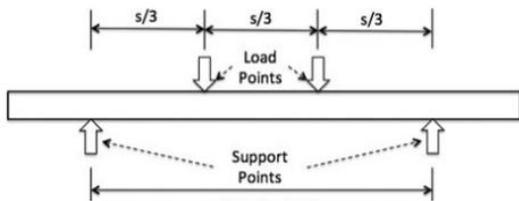
dengan δ adalah deformasi, *P* adalah beban terpusat pada jarak *a* dari tumpuan, *L* adalah panjang bentang balok dari tumpuan-ke-tumpuan, *E* (atau *MoE*) adalah modulus elastisitas balok kayu (arah longitudinal), dan *I* adalah momen inersia penampang balok.



Gambar 3 Balok Dengan Beban 2 Buah Beban *P* Pada Jarak Sebesar *a* Dari Masing-Masing Tumpuan (Goodno dan Gere 2018)

Pengujian lentur kayu

Benda uji lentur kayu untuk pengujian sifat mekanika lentur dapat dibuat berdasarkan acuan spesifikasi benda uji primer dan benda uji sekunder sesuai standar ASTM D143 (ASTM 2014). Metode pengujian lentur dapat mengacu sesuai metode pengujian *center-point loading test* ASTM D143 (ASTM 2014) atau metode pengujian *four-point loading test* ASTM D198 (ASTM 2015). Kecepatan pembebanan (*crosshead*) untuk keperluan uji lentur adalah adalah 2,5 mm/menit. Gambar 4 memperlihatkan skematik metode pengujian lentur dengan metode *four-point loading test*.



Gambar 4 Metode Pengujian *Four-Point Loading Test* (ASTM 2015)

Kekuatan lentur adalah kekuatan batas proporsional yang dapat dicapai kayu ketika komponen kayu tersebut mengalami kegagalan akibat momen lentur, sedangkan pada kondisi kekuatan batas ultimit disebut *Modulus of Rupture* (MoR). Kekuatan lentur pada kondisi beban batas proporsional (f_B) dapat dihitung dengan menggunakan dasar teori tegangan normal-lentur sesuai Persamaan 2.

$$f_B = \frac{M \cdot y}{I} \tag{2}$$

Parameter f_B adalah kekuatan lentur pada kondisi beban batas (titik batas) proporsional, M adalah momen lentur akibat beban yang bekerja, dan y adalah jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar penampang balok.

Berdasarkan metode ASTM D143 (ASTM 2014), maka kriteria kegagalan lentur balok terdiri dari beberapa klasifikasi sesuai kondisi retak yang terjadi. Klasifikasi kegagalan balok salah satunya adalah *simple tension*, yaitu terjadi retak pada serat terluar bagian tarik kemudian retak menjalar pada arah sejajar serat.

Modulus penampang elastik

Modulus penampang elastik (S) adalah momen inersia penampang balok (I) dibagi dengan jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar (y) dalam rentang beban batas elastik.

$$S = \frac{I}{y} \tag{3.a}$$

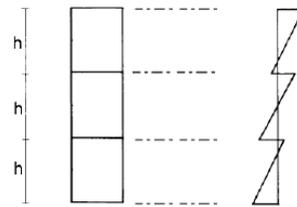
$$S_{eff} = k_s \cdot S \tag{3.b}$$

Persamaan 2 selanjutnya dapat ditulis,

$$f_B = \frac{M}{S} \tag{4.a}$$

$$f_{B-lam} = \frac{M}{S_{eff}} \tag{4.b}$$

S_{eff} adalah modulus penampang elastik balok laminasi dan k_s adalah rasio modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok utuh. Sedangkan f_{B-lam} adalah kekuatan lentur balok laminasi (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012).



(a). Balok laminasi (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012).



(b). Balok dengan penampang *solid*.

Gambar 5 Skematik Ilustrasi Perilaku Lentur Balok Laminasi dan Balok Dengan Penampang Utuh.

Perilaku slip antar lamina terjadi karena kompatibilitas regangan antara lem dan lamina tidak bekerja sempurna sehingga perilaku lentur balok laminasi tidak seperti balok utuh, tetapi tetap terjadi interaksi parsial antar lamina, ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 5.a (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok laminasi) dan Gambar 5.b (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok utuh).

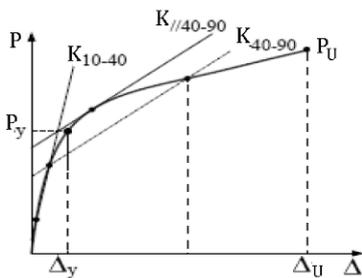
Persamaan 5 merupakan pengembangan dari Persamaan 1 khususnya untuk perhitungan deformasi balok kayu laminasi dengan beban yaitu P_{lam} maka besarnya rigiditas lentur balok laminasi sebesar k_{EI} lebih rendah dibandingkan rigiditas lentur balok berpenampang utuh (*solid*). k_{EI} dalam hal ini adalah rasio rigiditas lentur balok kayu laminasi-lem (*glulam*).

$$\delta = \frac{P_{lam} a}{24(k_{EI} \cdot E \cdot I)} (3L^2 - 4a^2) \quad (5)$$

Metode penentuan titik batas proporsional dan titik batas ultimit

Hasil pengujian eksperimental adalah berupa kurva hubungan beban versus deformasi, yaitu secara umum terdapat 2 kondisi pembebanan yang pertama kondisi rentang beban elastik dan kondisi beban pasca-elastik. Hal ini memerlukan metode untuk menentukan titik batas (beban batas) proporsional. Berdasarkan hasil penelitian Muñoz et al. (2008) maka terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan titik batas proporsional yaitu metode CEN, metode CSIRO, metode Karacabeyli dan Ceccotti, metode Yasumura dan Kawai, metode EEEP dan metode Offset 5%. Masing-masing metode diperuntukkan untuk tipe pengujian eksperimental properti mekanika kayu yang berbeda-beda.

Metode Yasumura dan Kawai banyak disarankan sebagai metode yang paling relevan untuk material kayu, prinsip dasar yaitu kekakuan inisial dihitung pada kondisi 10%, 40%, dan 90% titik batas (beban batas) ultimit (P_U). Rentang kondisi elastik ditentukan dari pertemuan dua garis, yaitu garis pertama adalah garis linier yang menghubungkan antara garis yang terbentuk dari pertemuan titik 10%-P_U dan 40%-P_U, sedangkan garis kedua adalah yang terbentuk dari pertemuan titik 40%-P_U dan 90%-P_U yang telah digeser sejajar sampai berimpit pada kurva beban-deformasi hasil pengujian. Ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Ilustrasi metode Yasumura dan Kawai (Muñoz et al. 2008)

Kekuatan lentur dan keawetan kayu Jabon

Dalam penelitian ini digunakan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Kayu Jabon banyak ditemui di berbagai pulau di Indonesia. Berdasarkan Atlas Kayu Indonesia (Martawijaya et al. 2005), kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas kuat III-IV dengan rentang berat jenis berkisar antara 290-560 kg/m³. Pada kondisi kering, kekuatan lentur (F_b) kayu Jabon pada kondisi batas proporsional adalah 37,96 MPa dan pada kondisi batas ultimit

(*Modulus of Rupture* atau MoR) adalah 67,79 MPa. Modulus elastisitas (E atau MoE) kayu Jabon adalah 6670,80 MPa.

Dalam kaitannya dengan keawetan kayu sebagai komponen penyusun bangunan gedung, terutama terhadap serangan rayap kayu, kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas II, sedangkan daya tahan terhadap serangan jamur pelapuk kayu termasuk dalam kategori kelas IV-V. secara umum kayu Jabon termasuk dalam kategori keterawetan kelas sedang.

Modulus Elastisitas Dinamik

Metode pengujian tidak merusak (non-destruktif) khususnya untuk pengujian material kayu merupakan salah satu metode untuk mendapatkan data empiris parameter Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) yang dihitung berdasarkan hubungan dengan berat jenis kayu (ρ, satuan kg/m³) dan kecepatan gelombang (v, satuan m/detik), yaitu menggunakan Persamaan 6 (CBS-CBT 2011).

$$E_{dyn} = \rho V^2 10^{-6} \quad (6)$$

Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) dan Modulus Elastisitas (E) telah dipelajari sebelumnya antara lain oleh Raymond et al. (2007), Benoit dan Sandoz (2011), Nowak, Hamrol-Bielecka, dan Jasieńko (2015), dan Poggi (2017). Raymond et al. (2007) dalam penelitiannya menyampaikan hubungan antara Modulus Elastisitas dengan Modulus Elastisitas Dinamik yang dinyatakan dalam Persamaan 7 sebagai berikut,

$$E = 0,899 E_{dyn} \quad ; R^2 = 0,93 \quad (7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian balok kayu laminasi lem dengan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Lamina kayu mempunyai ukuran penampang 60 mm x 40 mm, sistem laminasi yang digunakan adalah horisontal dengan jumlah lamina sebanyak 4 (empat) lamina, sehingga terbentuk balok dengan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* jenis *Strong Epoxy*. Perilaku lentur yang ditinjau adalah rigiditas lentur, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok. Proses pembuatan benda uji meliputi pemilahan kayu, pembuatan lamina kayu, dan pembuatan balok laminasi dengan lem.

Gambar 7 memperlihatkan proses pengukuran kadar air untuk mengetahui kadar air pada masing-masing lamina kayu. Seluruh benda uji disusun pada kondisi kadar air berkisar 7,0 % s.d. 11,5 %. Hasil ini

memperlihatkan bahwa kayu dalam kondisi kering mengacu pada peraturan kayu Indonesia SNI 7973:2013 (BSN 2013).



Gambar 7 Proses Pengukuran Kadar Air Pada Lamina Kayu.

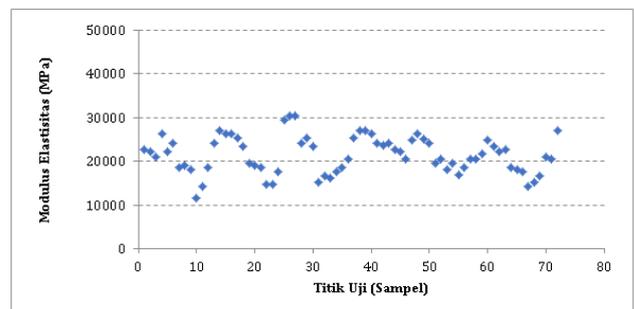
Gambar 8 memperlihatkan proses pemilihan kayu, yaitu pengujian sifat mekanika kayu Modulus Elastisitas masing-masing lamina kayu. Metode yang digunakan adalah uji non-destruktif (uji tidak merusak) dengan metode *direct measurement* dengan menggunakan alat uji Sylvatest TRIO (CBS-CBT 2011). Metode *direct measurement* merupakan salah satu metode pengukuran tidak merusak pada material kayu yang diperkenalkan oleh Benoit dan Sandoz (2011; CBS-CBT 2011) dengan alat ukur Sylvatest DUO yang dalam perkembangannya ditingkatkan kemampuannya dan mengalami perubahan nama alat ukur Sylvatest TRIO. Metode uji tidak merusak pada kayu Indonesia telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata dan Tobing (2016) yaitu penelitian sifat mekanika kayu Rumah Tradisional Minangkabau, serta oleh Pranata dan Rusli (2019) yaitu penelitian sifat mekanika Rumah Tradisional Minahasa.

Dalam penelitian ini benda uji berjumlah 3 balok dan masing-masing balok terdiri dari 4 lamina kayu, sehingga jumlah kayu yang digunakan adalah 12 batang. Seluruh batang selanjutnya diuji dengan menggunakan pengujian non-destruktif, dengan masing-masing batang diuji pada 6 titik sampel. Total titik uji adalah 72 titik sampel.



Gambar 8 Proses Pengujian Non-Destruktif untuk Mendapatkan Sifat Mekanika Modulus Elastisitas Dinamik.

Hasil pengujian non-destruktif selengkapnya ditampilkan pada Gambar 9. Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamik dilakukan dengan menggunakan Persamaan 6 dengan berat jenis kayu Jabon yaitu 425 kg/m^3 . Selanjutnya perhitungan Modulus Elastisitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan 7. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa Modulus Elastisitas rata-rata lamina kayu adalah $21433,93 \text{ MPa}$ dengan Deviasi Standar sebesar $4145,33 \text{ MPa}$ dan Koefisien Variasi sebesar $19,34\%$. Nilai Koefisien Variasi yang diperoleh adalah kurang dari 25% (SNI 7973 : 2013) sehingga secara umum seluruh batang kayu dapat digunakan sebagai lamina kayu. Data empiris modulus elastisitas yang diperoleh selanjutnya menjadi acuan bagi penyusunan lamina-lamina kayu pada balok laminasi.



Gambar 9 Hasil pengujian Non-Destruktif: Modulus Elastisitas (E) dengan Satuan MPa.

Gambar 10 memperlihatkan proses pengujian salah satu benda uji balok kayu laminasi.



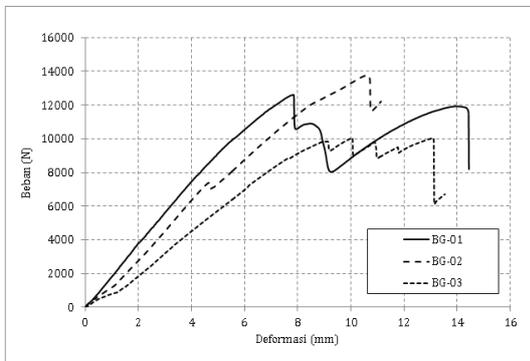
Gambar 10 Proses Pengujian Balok Laminasi Benda Uji.

Metode pengujian adalah *four-point loading test* dengan jarak a sebesar 500 mm ($1/3$ bentang balok). Selanjutnya Gambar 11 memperlihatkan ragam kegagalan balok yang terjadi pada benda uji yaitu *simple tension*, hal ini sesuai dengan salah satu model kegagalan benda uji lentur berdasarkan ASTM D143 (ASTM 2014), sehingga kegagalan yang diharapkan terjadi sesuai dengan hasil pengujian.



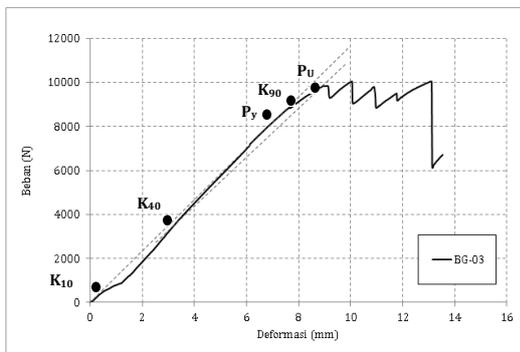
Gambar 11 Ragam Kegagalan Balok yang Terjadi untuk Seluruh Benda Uji yaitu *Simple Tension*.

Gambar 12 memperlihatkan kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok. Hasil pengujian seluruh benda uji memperlihatkan trend kurva yang hampir sama, deformasi maksimum berkisar antara 7,65 mm s.d. 10,54 mm, beban maksimum berkisar antara 9,98 kN s.d. 13,74 kN.



Gambar 12 Kurva Diagram Hubungan Beban Versus Deformasi Balok.

Gambar 13 memperlihatkan contoh perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit). Perhitungan titik batas proporsional (P_y) menggunakan literatur Muñoz et al. (2008) dengan menggunakan Metode Yasumura dan Kawai.



Gambar 13 Perhitungan Titik Batas Proporsional (Beban Batas Proporsional) dan Titik Batas Ultimit (Beban Batas Ultimit) pada Benda Uji BG-03.

Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1. Hasil Tabel 1 memperlihatkan bahwa rasio

daktilitas peralihan balok rata-rata adalah sebesar 1,28. Beban batas proporsional rata-rata adalah sebesar 10,43 kN, beban batas ultimit rata-rata adalah sebesar 12,07 kN.

Tabel 1 Hasil Perhitungan Titik Batas (Beban Batas) Proporsional dan Ultimit, dan Rasio Daktilitas Balok.

Benda Uji	P_y (kN)	d_y (mm)	P_u (kN)	D_u (mm)	μ
BG-01	10,51	5,97	12,49	7,65	1,28
BG-02	12,14	8,62	13,74	10,54	1,22
BG-03	8,66	7,44	9,98	9,93	1,33
rerata	10,43	7,34	12,07	9,37	1,28

Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2 Persamaan 3, dan Persamaan 4 dilakukan perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Rasio Rigiditas Lentur Balok Laminasi.

Benda Uji	M_y (kN.mm)	f_{b-lam} (MPa)	f_b (MPa)	k_s
BG-01	5250,71	20,51	37,96	0,54
BG-02	6067,72	23,70	37,96	0,62
BG-03	4329,69	16,91	37,96	0,45
rerata	5216,04	20,38	37,96	0,54

Perhitungan modulus penampang elastik dan tegangan lentur dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Hasil Tabel 2 memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu laminasi-lem rata-rata adalah 20,38 MPa, sedangkan kekuatan lentur balok utuh sesuai referensi Atlas Kayu Indonesia adalah sebesar 37,96 MPa. Maka diperoleh rasio modulus penampang elastik balok rata-rata adalah sebesar 0,54.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian adalah kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh, dalam penelitian ini diperoleh rasio modulus penampang elastik sebesar 0,54, rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28.

Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur mengacu pada kriteria kegagalan lentur sesuai ASTM D143.

Parameter modulus penampang elastik (S) balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan *serviceability*. Dalam peraturan kayu Indonesia, parameter tersebut digunakan untuk perhitungan kekuatan lentur terkoreksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan pada Universitas Kristen Maranatha melalui Hibah Penelitian Internal sehingga penulis dapat mengadakan pengujian, dan melakukan kegiatan penelitian tanpa kendala. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fernando Salim, Christianto, Eki Romario, Diego Jundo Banjar Nahor, Muhammad Maruf, dan Stefanny Abigail sehingga proses pembuatan benda uji dan pengujian dapat berjalan dengan lancar di Laboratorium Struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction. 2016. "Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16." USA.
- American Society for Testing and Materials. 2014. "ASTM D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International." West Conshohocken, PA.
- . 2015. "ASTM D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, ASTM International." West Conshohocken, PA.
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. "Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu SNI 7973:2013." BSN.
- Benoit, Y, dan J L Sandoz. 2011. "New Wooden Poles Grading Using Non-Destructive Technology." In *21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt*, 6–9.
- Bohnhoff, David R., Steven M. Cramer, Russell C. Moody, dan Calvin O. Cramer. 1989. "Modeling vertically mechanically laminated lumber." *Journal of Structural Engineering (United States)* 115 (10): 2661–79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:10\(2661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:10(2661)).
- CBS-CBT. 2011. "Sylvatest TRIO User Manual." CBS-CBT.
- Chauf, Kusnindar Abdul, dan Sri Murni Dewi. 2016. "Structural Efficiency and Flexure Strength of Mix-Glulam Timber Beams are Composed of Sengon and Coconut Wood as Green Material Constructions." In *The 2nd International*

Multidisciplinary Conference. Vol. 1. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta. November 15th, 2016.

- Ezeagu, C A, A F Eromosele, H Okoro, U J Chukwujkwu, dan T B Emetomo. 2015. "Flexural Strength of solid and glue-laminated timber beams." *American Journal of Engineering Science and Technology Research* 3 (1): 1–14.
- Gliniorz, Kai Uwe, Khalid M. Mosalam, dan Julius Natterer. 2002. "Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks." *Composites Part B:Engineering* 33 (5): 367–81. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00020-3).
- Goodno, Barry J., dan James M. Gere. 2018. *Mechanics of Materials*. Eight. Boston: Cengage Learning.
- Kamiya, Fumio. 1985. "The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams." *Wood and Fiber Science* 17 (1): 117–31.
- Martawijaya, A, I Kartasujana, K Kadir, dan S P Among. 2005. "Atlas Kayu Indonesia Jilid I Cetakan ke Tiga (edisi revisi)." *Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan*. Bogor: Departemen Kehutanan.
- Massaro, Francesco Mirko, dan Kjell Arne Malo. 2019. "Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain." *European Journal of Wood and Wood Products* 77 (5): 821–32. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01437-4>.
- Muhammed, C K Umaima, dan R Arya. 2015. "Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4 (4): 2485–93. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404051>.
- Muñoz, Williams, Alexander Salenikovich, Mohammad Mohammad, dan Pierre Quenneville. 2008. "Determination of yield point and ductility of timber assemblies: In search for a harmonised approach." In *10th World Conference on Timber Engineering 2008*, 2:1064–71.
- Nowak, T, K Hamrol-Bielecka, dan J Jasieńko. 2015. "Experimental testing of glued laminated timber members using ultrasonic and stress wave techniques." In *Proc. of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures–SHATIS*, 15:523–33.
- Poggi, Francesco. 2017. "Bending Properties of Commercial Wood-based Panels by NDT Methods." Master Thesis in Forestry and Wood Technology: Linnaeus University.

- Pranata, Yosafat Aji, dan Heri Lumban Tobing. 2016. "Non-destructive Testing to Obtain the Dynamic Elastic Modulus of the Existing Minangkabau Wooden House." In *International Conference on Technology, Innovation, Society (ICTIS)*, 389–93. <https://doi.org/10.21063/ictis.2016.1060>.
- Pranata, Yosafat Aji, dan Muhammad Rusli. 2019. "Non-Destructive Testing of The Existing Timber Columns of Minahasa Traditional House." In *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10:313–22. IAEME Publication.
- Pranata, Yosafat Aji, dan Bambang Suryoatmono. 2019. *Systruktur Kayu: Analisis dan Desain dengan LRFD*. Bandung: Remaja Rosdakarya.
- Pranata, Yosafat Aji, Bambang Suryoatmono, dan Johannes Adhijoso Tjondro. 2011. "The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam." In *EACEF-International Conference of Civil Engineering*, 1:33. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- . 2012. "Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi-Baut." *Jurnal Teknik Sipil* 19 (3): 223. <https://doi.org/10.5614/jts.2012.19.3.4>.
- Raymond, Carolyn A., B. Joe, R. Evans, dan R. L. Dickson. 2007. "Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and SilviScan properties for Pinus radiata in New South Wales." *New Zealand Journal of Forestry Science* 37 (2): 186–96.



Judul : Modul Penampang Elastik Balok Kayu Jabon *Glulam*

No. : 304

No	Uraian	Komentar
	Selingkung :	
1	Apakah Topik Sesuai dengan Lingkup Jurnal Permukiman?	Sudah sesuai
2	Sistematika penulisan :	
	a. Judul naskah sesingkat mungkin dan harus mencerminkan substansi tulisan serta tidak memberikan peluang penafsiran yang beragam.	Judul kurang jelas, Section modulus is a geometric property for a given cross-section used in the design of beams or flexural members. Other geometric properties used in design include area for tension and shear, radius of gyration for compression, and moment of inertia and polar moment of inertia for stiffness. Any relationship between these properties is highly dependent on the shape in question. Equations for the section moduli of common shapes are given below. There are two types of section moduli, the elastic section modulus and the plastic section modulus. The section moduli of different profiles can also be found as numerical values for common profiles in tables listing properties of such.
	b. Abstrak apakah sudah memberikan informasi yang akurat mengenai isi naskah, argumentasi logis penelitian, pendekatan pemecahan masalah, hasil, dan kesimpulan (maksimal 250 kata disertai 5 kata kunci)	Tujuan kurang jelas, tujuan mempelajari modulus penampang itu apa? Mohon ditambahkan proses perekatan dan jenis perekatnya.
	c. Pendahuluan (merupakan <i>extended abstract</i> mencakup latar belakang masalah, perumusan masalah, review penelitian terdahulu, batasan dan asumsi yang digunakan, serta tujuan penelitian, dan hipotesis bila ada?). d. Apakah dasar teori relevan dengan topik yang diamati? Apakah dasar teori menggunakan acuan mutakhir?	Mohon dijelaskan konten ilmiah dari tujuan mempelajari parameter modulus penampang elastik dari gluelam Ruang lingkup sebaiknya dimasukkan dalam bab metode penelitian Pernyataan bahwa kekuatan lentur gluelam lebih rendah dari pada kayu solid, pernyataan ini diragukan dan perlu dicantumkan jenis kayu (kayu sengon dan kelapa), mohon dilampirkan makalahnya. Gambar 1, 2 dan 3 tidak perlu dicantumkan karena tidak ada informasi ilmiahnya.
	e. Apakah dalam naskah terdapat pernyataan kebaruan temuan (<i>novelty</i>) dan/atau kemutakhiran (<i>state of the art</i>)	Belum kelihatan, oleh karena itu penulis diharapkan menjelaskan kebaruan(<i>novelty</i>) dari karya tulis ini di mana?

	<p>Metode Penelitian</p> <p>f. Apakah ada rancangan riset, pendekatan dan pisau analisis yang digunakan?</p> <p>g. Apakah data yang digunakan cukup mutakhir; atau pemilihan sampel yang diambil mewakili populasi?</p> <p>h. Apakah metode yang digunakan kuat (<i>robust and vigorous</i>)?</p>	<p>Sebaiknya semua teori dan rumus-rumusny dimasukkan dalam pendahuluan. Dalam metode penelitian hanya mencantumkan rancangan riset (termasuk proses pembuatan sampel, jenis kayu dan perekat), dan analisi yang digunakan.</p> <p>Dalam proses pembuatan glue lam itu setiap balok laminanya harus diuji sifat mekaninya dengan menggunakan NDT sehingga diketahui kekuatan setiap lamina dalam rangka penyusunan posisi masing-masing lamina pada glue lam.</p> <p>Sebutkan perekat yang digunakan jenis apa dan besaran pengempaan (press) berapa kg/cm²?</p> <p>Alinea yang berisi tentang definisi glue lam dan karakteristik jalon sebaiknya dipindahkan ke pendahuluan.</p> <p>Secara keseluruhan pada metode penelitian masih campur aduk metode penelitian dengan kajian pustaka, dan teori. Metode penelitiannya masih lemah sehingga tidak dapat diduplikasi.</p>
	<p>Hasil dan Pembahasan</p> <p>i. Apakah ada bahasan hasil analisis yang dapat menjawab pertanyaan penelitian, atau hasil analisis yang lebih baik dari rancangan semula?</p> <p>j. Apakah ada uji validitas dan reliabilitas terhadap hasil uji/ pengolahan data?</p>	<p>Alinea 1, 2 dan 3, sebaiknya dimasukkan dalam metode penelitian dan Gambar 9, 10, dan 11 tidak perlu dicantumkan atau dihilangkan saja.</p> <p>Pada Gambar 12, mengapa kerusakannya terjadi seperti itu, mohon dijelaskan bentuk kerusakannya yaitu terjadi pada lapisan lemnya atau patah pada baloknya, dan jelaskan juga penyebab terjadinya kerusakan tersebut.</p> <p>Beri penjelasan yang rinci atau detail arti gambar 13. Dan beri penjelasan peran serta pentingnya gambar 14 dalam pembahasan ini. Tambahkan penjelasan arti dari Tabel 1 dan 2 dikaitkan dengan judul makalah. Dan bahas lebih dalam dengan membandingkan hasil penelitian orang lain.</p> <p>Pada Tabel 1 dan 2 mohon diberi keterangan simbol atau hurup yang digunakan dalam tabel itu apa artinya sehingga mudah dimengerti.</p> <p>Secara keseluruhan pembahasannya masih dangkal, erlu dibahas lebih mendala dengan mengkaitkan teori dan hasil penelitian orang lain</p>
	<p>Kesimpulan</p> <p>k. Segitiga konsistensi yang perlu dipenuhi, apakah ada keseuaian antara (masalah-tujuan-kesimpulan),</p>	<p>Kesimpulan yang diambil tidak ada dasar ilmiahnya dan diambil dari bagian mana dalam bab hasil dan pembahasan. Sebagian besar kesimpulan tidak pernah dibahas dalam bab</p>

	apakah kesimpulan sudah menjawab masalah yang timbul?	hasil dan pembahasan. Sebagai contoh kegagalan lentur, tidak ada pembahasannya, demikian juga kegunaan parameter modulus penampang pada desain komponen struktur tidak dibahas sama sekali
	l. Ucapan terima kasih (pihak yang terlibat penyusunan, organisasi/institusi, individu)	Click or tap here to enter text.
	m. Daftar Pustaka (Minimal 10 untuk hasil penelitian, minimal 25 untuk tinjauan/review), setiap rujukan daftar pustaka diacu ke dalam catatan tubuh (sitasi). n. Daftar pustaka harus berisi : - Acuan primer (jurnal, prosiding) sekurang-kurangnya 80% dari seluruh acuan - Acuan yang mutakhir (5 tahun terakhir) sekurang-kurangnya 80% dari seluruh acuan	Mohon penulis melampirkan abstrak dari setiap pustaka diambil.
	o. Lampiran (bila ada) berisi informasi yang relevan dengan substansi tulisan.	-
4	Pendahuluan + metode Penelitian jumlahnya 40% panjang tulisan, Hasil + Kesimpulan jumlahnya 60% panjang tulisan Pendahuluan adalah <i>extended</i> dari abstrak mohon tidak menyertakan sub-sub bab dibawahnya.	Click or tap here to enter text.
5	Komentar Reviewer lain - Antara pendahuluan dan metode penelitian serta hasil pembahasan masih campur aduk, perlu ada pemindahan narasi dari metode ke pendahuluan, dan dari hasil ke metode. Dalam metode proses pembuatan glue lam ini harus dilakukan pengujian dari setiap lamina sebagai dasar penentuan letak lamina pada susunan glue lam, hal ini belum diketahui karena dalam metode penelitian tidak ada penjelasannya. - Pada bab hasil dan pembahasannya, masih sangat minim dan dangkal, penulis belum memberi penjelasan yang rinci tentang data hasil penelitiannya, belum mengkaitkan hasil penelitiannya dengan penelitian orang lain. - Kesimpulan yang ditulis tidak ada pembahasan dalam bab hasil dan pembahasan *Lihat catatan pada teks naskah Rekomendasi Reviewer: Choose an item.	

Keterangan :

- Acuan primer terdiri dari : proceeding, jurnal, skripsi, tesis ;
- Buku, Data BPS, UU dan Laporan Akhir tidak termasuk dalam acuan primer.

MODULUS PENAMPANG ELASTIK BALOK KAYU JABON *GLULAM*

Elastic Section Modulus of Glulam Jabon Timber Beams

Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto, Aan Darmawan

Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Suria Sumantri 65 Bandung, 40164, Jawa Barat

E-mail: yosafat.ap@gmail.com, anang.kristianto@gmail.com, valfa007@gmail.com

Article history:

Received date:

Received in revised form date:

Accepted date:

Available online date:

Abstrak

Modulus penampang elastik balok merupakan salah satu parameter yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan balok, secara khusus berhubungan dengan momen inersia penampang. Modulus penampang elastik balok kayu utuh (solid) tidak sama dengan balok kayu laminasi untuk studi kasus balok dengan ukuran penampang sama, hal ini dikarenakan momen inersia penampang balok laminasi perhitungannya berbeda dengan balok utuh akibat adanya slip antar lamina pada saat beban bekerja serta besarnya modulus elastisitas yang tidak sama pada setiap lamina, sehingga perilaku lentur balok menjadi satu kesatuan dalam kaitannya dengan kekuatan balok. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari modulus penampang elastik balok kayu laminasi lem (*glulam*). Ruang lingkup penelitian yaitu benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.) ukuran penampang 60x160 mm, jumlah lamina 4 (empat), sistem laminasi menggunakan lem super adhesive, pengujian lentur menggunakan metode four-point loading test, perilaku lentur yang ditinjau adalah kekuatan lentur, modulus penampang elastik, dan rasio daktilitas balok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa modulus penampang elastik dan tegangan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh dengan rasio sebesar 0,54, serta rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28 sehingga termasuk dalam kriteria daktilitas terbatas. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur. Parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan serviceability.

Kata Kunci : Rigiditas lentur, balok, laminasi, lem, Jabon.

Abstract

The elastic cross-section modulus of the beam is one of the parameters related to the strength and stiffness of the beam, specifically related to the inertia moment of the cross-section. The elastic cross-section modulus of solid timber beam is not the same as laminated timber beam for the case study of beam with the same cross-section size, this is because the inertia moment of cross-section of the laminated beam calculation is different from the solid beam due to slippage between lamina when the load is working and the magnitude of the elastic modulus which is not the same in every lamina, so that the flexural behavior of the beam becomes a single unit in relation to the strength of the beam. The purpose of this study was to study the elastic cross-section modulus of glue-laminated wood (*glulam*). The scope of the study is the beam test object made of Jabon wood (*Anthocephalus cadamba* Miq.) 60x160 mm cross-section size, 4 (four) lamina numbers, lamination system using super adhesive glue, flexural testing using the four-point loading test method, the flexural behavior that is reviewed are flexural strength, elastic cross-section modulus, and beam ductility ratio. The results showed that the elastic cross-section modulus and the flexural stress of the laminated timber beams were lower than the solid timber beams with a ratio of 0.54, and the ductility ratio of the laminated wooden beams was 1.28 so that they were categorized in the limited ductility criteria. The test results indicate that the failure of glue-laminated timber beams is a failure of bending. The elastic modulus cross-section parameters of laminated timber beams are useful for the design of beam structure components in buildings, especially in the calculation of beam strength and beam stiffness as a serviceability requirement.

Keywords : Flexural rigidity, beam, laminated, glue, Jabon.

PENDAHULUAN

Balok laminasi lem atau Glulam (*glue-laminated*) merupakan balok yang disusun dari dua atau lebih lamina kayu dan dirangkai secara vertikal, horisontal, atau kombinasi silang, sehingga didapatkan penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan. Sistem laminasi bermanfaat untuk mengatasi permasalahan keterbatasan dimensi bahan kayu yang ada. Sistem perekatan dilakukan dengan menggunakan lem yang telah diuji kekuatan gesernya sehingga slip antar lamina kayu dapat direduksi seminimal mungkin.

Salah satu manfaat balok laminasi adalah dapat menghasilkan ukuran penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan dari dua atau lebih lamina-lamina kayu, sebagai contoh balok kayu ukuran penampang 60 mm x 40 mm apabila disusun sebanyak empat lamina maka akan menghasilkan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Masing-masing lamina tersebut direkatkan menggunakan perekat/lem.

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi lem (glulam).

Ruang lingkup penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.).
2. jumlah lamina 4 (empat), dengan ukuran masing-masing lamina adalah 60 mm x 40 mm, sehingga membentuk ukuran penampang balok 60 mm x 160 mm.
3. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive*.
4. Jumlah benda uji adalah 3 (tiga) buah benda uji balok. Panjang balok (jarak antar tumpuan) adalah 1500 mm.
5. Pengujian lentur mengacu pada standar ASTM D198 (ASTM, 2015) dengan metode pengujian destruktif *four-point bending test*.
6. Perilaku lentur yang ditinjau adalah modulus penampang elastik, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok.

Perkembangan penelitian balok kayu laminasi lem (*glulam*) sudah sangat pesat. Dimulai dari penelitian untuk mempelajari perilaku lentur balok, penelitian terkait rigiditas balok, penelitian variasi jenis kayu, penelitian variasi sistem laminasi yang digunakan, penelitian terkait usulan metode-metode perkuatan untuk meningkatkan kinerja lentur, sampai dengan penelitian untuk mengetahui kinerja dan perilaku lentur akibat beban jangkang panjang.

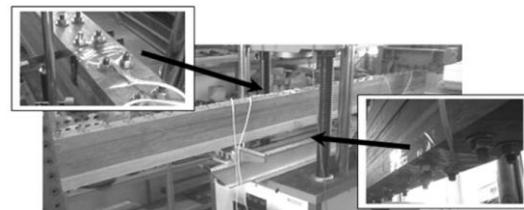
Penelitian terkait perbandingan kekuatan lentur balok kayu utuh dan balok kayu laminasi lem telah dilakukan oleh Ezeagu dkk. (Ezeagu dkk., 2015) untuk kayu jenis daun jarum (*softwood*). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah berkisar 37%-66% dibandingkan dengan kayu utuh. Dari segi manfaat, kayu laminasi lem memberikan manfaat dimensi dan ukuran penampang yang lebih besar.



Gambar 1 Pengujian Balok Kayu Laminasi Oleh Ezeagu dkk. (Ezeagu dkk., 2015).

Penelitian kekuatan lentur balok laminasi lem dengan pendekatan analitis dan numerik telah dilakukan oleh Umaira dan Arya (Umaira dan Arya, 2015), balok menggunakan sistem laminasi horizontal dengan variasi ketebalan lamina yang berbeda-beda. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ketebalan lamina tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lentur balok laminasi.

Penelitian terkait rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata dkk. (Pranata dkk., 2011; Pranata dkk., 2012) yaitu sistem laminasi mekanik menggunakan alat sambung baut. Penelitian dilakukan terhadap 6 (enam) jenis kayu Indonesia. Hasil penelitian secara umum memperlihatkan bahwa rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi-baut berkisar antara 0,38-0,91. Rasio modulus penampang elastik (S) balok laminasi mekanik dapat mencapai kondisi rasio 0,91 terhadap balok utuh, hal ini dapat tercapai dengan spasi antar baut 100 mm, sehingga pada saat balok dibebani lentur, slip yang terjadi antar lamina dapat berkurang, sehingga momen inersia penampang balok laminasi mendekati momen inersia penampang balok utuh.



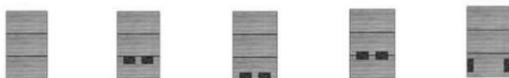
Gambar 2 Penelitian Terkait Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi Mekanis (Pranata dkk., 2012).

Penelitian kekuatan lentur sistem laminasi-baut dengan orientasi arah laminasi vertikal juga telah dilakukan oleh Pranata dkk. (Pranata dkk., 2019). Tujuan orientasi sistem lamina pada arah vertikal adalah untuk mendapatkan dimensi lebar (b) yang lebih besar dan bermanfaat sebagai sistem struktur lantai (*slab*) bangunan bertingkat. Hasil penelitian membahas tentang kekuatan lentur sistem laminasi akibat beban gravitasi dan perilaku struktur lantai akibat beban getaran.

Perilaku struktur balok kayu laminasi lem dengan sistem perkuatan tambahan antara lain telah dilakukan oleh Anshari dkk (Anshari dkk., 2012), dengan tambahan perkuatan berupa kayu dengan mutu lebih rendah yang telah dikompresi (Gambar 3), sistem perkuatan tersebut dapat meningkatkan kinerja kekuatan dan kekakuan balok. Penelitian balok laminasi lem yang diperkuat dengan strip bambu juga telah dilakukan oleh Khadafi dkk. (Khadafi dkk., 2018) dengan hasil penelitian adalah peningkatan kekuatan lentur yang signifikan yaitu mencapai 20%. Penelitian tentang metode perkuatan pada bagian takikan (*nocth*) telah dilakukan oleh Jockwer (Jockwer, 2016) dengan hasil yaitu sistem perkuatan dapat mencegah terjadinya kerusakan akibat gagal geser pada daerah takikan, sehingga perilaku lentur balok menjadi lebih daktil.



Gambar 3 Pengujian Balok Glulam Yang Diberi Perkuatan (Anshari dkk., 2012).



Gambar 4 Balok Kayu Laminasi Tanpa Perkuatan dan Dengan 4 (empat) Variasi Perkuatan Strip Bambu (Khadafi dkk., 2018).

Penelitian balok laminasi lem (*glulam*) dengan kombinasi lebih dari satu jenis kayu telah dilakukan oleh Chauf dan Dewi (Chauf dan Dewi, 2016) dengan hasil penelitian adalah diperoleh model struktur laminasi yang efisien dan kekuatan lentur yang optimal dengan tipe kegagalan yaitu getas.

Penelitian perilaku lentur balok laminasi lem akibat beban jangka panjang (*long-term behavior*)

telah dipelajari oleh Massaro (Massaro, 2019) untuk jenis kayu *Norway Spruce*. Penelitian dilakukan dengan pendekatan pengujian eksperimental dan analisis numeric.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi eksperimental di laboratorium. Secara umum tahapan penelitian terdiri dari 4 (empat) tahap, yaitu tahap pertama studi literatur terkait modulus elastisitas balok kayu, rigiditas lentur balok kayu, kayu laminasi lem, serta tata cara pengujian lentur kayu berdasarkan ASTM. tahap kedua yaitu pembuatan benda uji balok kayu laminasi lem. Tahap ketiga adalah pengujian eksperimental di laboratorium. Tahap keempat adalah proses mengolah data kurva kapasitas lentur balok yaitu kurva hubungan beban versus peralihan menjadi parameter rigiditas lentur balok kayu laminasi, kekuatan lentur balok kayu laminasi, dan rasio daktilitas peralihan balok.

Balok kayu laminasi lem (Glulam)

Glulam adalah susunan beberapa lapis kayu direkatkan satu sama lain menjadi satu kesatuan dengan mereduksi kemungkinan terjadinya diskontinuitas atau slip antar lamina. Sistem laminasi merupakan salah satu upaya menghasilkan desain penampang balok kayu yang ekonomis dan memenuhi prinsip struktural.

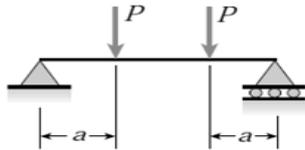
Perekat merupakan material dengan sifat dominan berupa kimiawi. Lamina-lamina kayu yang direkatkan oleh lem akan memungkinkan berdampak pada perubahan sifat mekanis kayu, khususnya kekakuan dan kekuatan lentur. Apabila balok disusun dengan jumlah lamina yang semakin banyak, maka semakin besar pula luas bidang rekatan, sehingga dampaknya berkaitan pula dengan tipe perekat terhadap kinerja kekakuan dan kekuatan.

Deformasi balok

Modulus elastisitas adalah kemiringan proporsional garis linier dari kurva hubungan beban dan deformasi (dalam rentang beban elastik), dalam konteks ini adalah beban lentur pada balok dan deformasi adalah lendutan balok akibat adanya beban yang bekerja. Untuk kondisi balok sederhana dengan beban 2 (dua) buah terpusat pada masing-masing jarak sejauh a dari tumpuan masing-masing seperti ilustrasi pada Gambar 5, maka hubungan deformasi terhadap beban dinyatakan dalam Persamaan 1 (Gere dan Goodno, 2018).

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

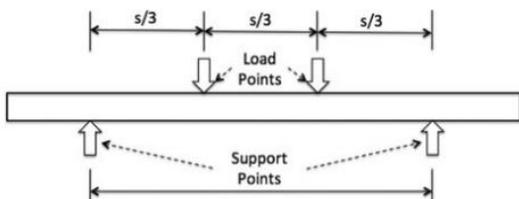
dengan δ adalah deformasi, P adalah beban terpusat pada jarak a dari tumpuan, L adalah panjang bentang balok dari tumpuan-ke-tumpuan, E (atau MoE) adalah modulus elastisitas balok kayu (arah longitudinal), dan I adalah momen inersia penampang balok.



Gambar 5 Balok Dengan Beban 2 Buah Beban P Pada Jarak Sebesar a Dari Masing-Masing Tumpuan (Gere dan Goodno, 2018).

Pengujian lentur kayu

Benda uji lentur kayu untuk pengujian sifat mekanika lentur dapat dibuat berdasarkan acuan spesifikasi benda uji primer dan benda uji sekunder sesuai standar ASTM D143 (ASTM, 2014). Metode pengujian lentur dapat mengacu sesuai metode pengujian *center-point loading test* ASTM D143 (ASTM, 2014) atau metode pengujian *four-point loading test* ASTM D198 (ASTM, 2015). Kecepatan pembebanan (*crosshead*) untuk keperluan uji lentur adalah adalah 2,5 mm/menit. Gambar 6 memperlihatkan skematik metode pengujian lentur dengan metode *four-point loading test*.



Gambar 6 Metode Pengujian *Four-Point Loading Test* (ASTM, 2015).

Kekuatan lentur adalah kekuatan batas proporsional yang dapat dicapai kayu ketika komponen kayu tersebut mengalami kegagalan akibat momen lentur, sedangkan pada kondisi kekuatan batas ultimit disebut *Modulus of Rupture* (MoR). Kekuatan lentur pada kondisi beban proporsional (f_B) dapat dihitung dengan menggunakan dasar teori tegangan normal-lentur sesuai Persamaan 2.

$$f_B = \frac{M \cdot y}{I} \quad (1)$$

Parameter f_B adalah kekuatan lentur pada kondisi beban batas (titik batas) proporsional, M adalah momen lentur akibat beban yang bekerja, dan y adalah jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar penampang balok.

Berdasarkan metode ASTM D143 (ASTM, 2014), maka kriteria kegagalan lentur balok terdiri dari beberapa klasifikasi sesuai kondisi retak yang terjadi. Klasifikasi kegagalan balok salah satunya adalah *simple tension*, yaitu terjadi retak pada serat terluar bagian tarik kemudian retak menjalar pada arah sejajar serat.

Modulus penampang elastik

Modulus penampang elastik (S) adalah momen inersia penampang balok (I) dibagi dengan jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar (y) dalam rentang beban batas elastik.

$$S = \frac{I}{y} \quad (3.a)$$

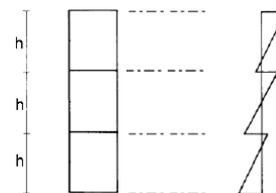
$$S_{\text{eff}} = k_s \cdot S \quad (3.b)$$

Persamaan 2 selanjutnya dapat ditulis,

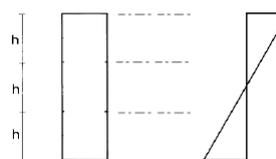
$$f_B = \frac{M}{S} \quad (4.a)$$

$$f_{B-\text{lam}} = \frac{M}{S_{\text{eff}}} \quad (4.b)$$

S_{eff} adalah modulus penampang elastik balok laminasi dan k_s adalah rasio modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok utuh. Sedangkan $f_{B-\text{lam}}$ adalah kekuatan lentur balok laminasi (Pranata dkk., 2012).



(a). Balok laminasi (Pranata dkk., 2012).



(b). Balok dengan penampang *solid*.

Gambar 7 Skematik ilustrasi perilaku lentur balok laminasi dan balok dengan penampang utuh.

Perilaku slip antar lamina terjadi karena kompatibilitas regangan antara lem dan lamina tidak bekerja sempurna sehingga perilaku lentur balok laminasi tidak seperti balok utuh, tetapi tetap terjadi interaksi parsial antar lamina, ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 7.a (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok laminasi) dan Gambar 7.b (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok utuh).

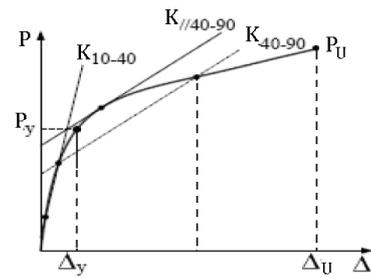
Persamaan 5 merupakan pengembangan dari Persamaan 1 khususnya untuk perhitungan deformasi balok kayu laminasi dengan beban yaitu P_{lam} maka besarnya rigiditas lentur balok laminasi sebesar k_{EI} lebih rendah dibandingkan rigiditas lentur balok berpenampang utuh (*solid*). k_{EI} dalam hal ini adalah rasio rigiditas lentur balok kayu laminasi-lem (*glulam*).

$$\delta = \frac{P_{lam} a}{24(k_{EI} \cdot E \cdot I)} (3L^2 - 4a^2) \quad (5)$$

Metode penentuan titik batas proporsional dan titik batas ultimit

Hasil pengujian eksperimental adalah berupa kurva hubungan beban versus deformasi, yaitu secara umum terdapat 2 kondisi pembebanan yang pertama kondisi rentang beban elastik dan kondisi beban pasca-elastik. Hal ini memerlukan metode untuk menentukan titik batas (beban batas) proporsional. Berdasarkan hasil penelitian Munoz dkk. (Munoz dkk., 2010) maka terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan titik batas proporsional yaitu metode CEN, metode CSIRO, metode Karacabeyli dan Ceccotti, metode Yasumura dan Kawai, metode EEEP dan metode Offset 5%. Masing-masing metode diperuntukkan untuk tipe pengujian eksperimental properti mekanika kayu yang berbeda-beda.

Metode Yasumura dan Kawai banyak disarankan sebagai metode yang paling relevan untuk material kayu, prinsip dasar yaitu kekakuan inisial dihitung pada kondisi 10%, 40%, dan 90% titik batas (beban batas) ultimit (P_U). Rentang kondisi elastik ditentukan dari pertemuan dua garis, yaitu garis pertama adalah garis linier yang menghubungkan antara garis yang terbentuk dari pertemuan titik 10%- P_U dan 40%- P_U , sedangkan garis kedua adalah yang terbentuk dari pertemuan titik 40%- P_U dan 90%- P_U yang telah digeser sejajar sampai berimpit pada kurva beban-deformasi hasil pengujian. Ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Ilustrasi metode Yasumura dan Kawai (Munoz dkk., 2010).

Kekuatan lentur dan keawetan kayu Jabon

Dalam penelitian ini digunakan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba Miq.*). Kayu Jabon banyak ditemui di berbagai pulau di Indonesia. Berdasarkan Atlas Kayu Indonesia (PTHH, 2004), kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas kuat III-IV dengan rentang berat jenis berkisar antara 290-560 kg/m³. Pada kondisi kering, kekuatan lentur (F_b) kayu Jabon pada kondisi batas proporsional adalah 37,96 MPa dan pada kondisi batas ultimit (*Modulus of Rupture* atau *MoR*) adalah 67,79 MPa. Modulus elastisitas (E atau *MoE*) kayu Jabon adalah 6670,80 MPa.

Dalam kaitannya dengan keawetan kayu sebagai komponen penyusun bangunan gedung, terutama terhadap serangan rayap kayu, kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas II, sedangkan daya tahan terhadap serangan jamur pelapuk kayu termasuk dalam kategori kelas IV-V. secara umum kayu Jabon termasuk dalam kategori keterawetan kelas sedang.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian balok kayu laminasi lem dengan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba Miq.*). Lamina kayu mempunyai ukuran penampang 60 mm x 40 mm, sistem laminasi yang digunakan adalah horisontal dengan jumlah lamina sebanyak 4 (empat) lamina, sehingga terbentuk balok dengan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive*. Perilaku lentur yang ditinjau adalah rigiditas lentur, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok.

Gambar 9 memperlihatkan proses pembuatan benda uji balok kayu laminasi. Selanjutnya Gambar 10 memperlihatkan proses *setup* benda uji pada instrument alat uji *Universal Testing Machine*. Sedangkan Gambar 11 memperlihatkan proses pengujian balok laminasi benda uji BG-01, BG-02, dan BG-03.



Gambar 9 Proses pembuatan benda uji balok laminasi.



Gambar 10 Proses setup benda uji pada instrument alat uji *Universal Testing Machine*.

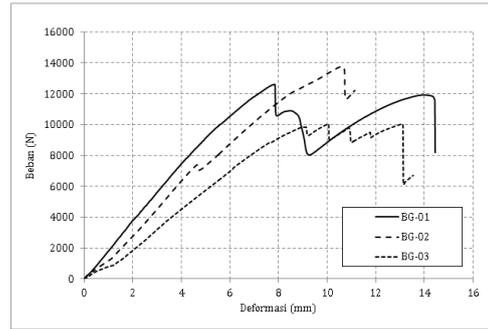


Gambar 11 Proses pengujian balok laminasi benda uji BG-01, BG-02, dan BG-03.

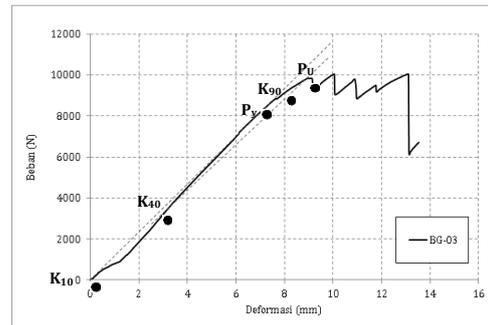
Metode pengujian adalah *four-point loading test* dengan jarak a sebesar 500 mm ($1/3$ bentang balok). Selanjutnya Gambar 12 memperlihatkan ragam kegagalan balok yang terjadi pada benda uji yaitu *simple tension*. Gambar 13 memperlihatkan kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok. Gambar 14 memperlihatkan contoh perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit).



Gambar 12 Ragam kegagalan balok yang terjadi untuk seluruh benda uji yaitu *simple tension*.



Gambar 13 Kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok.



Gambar 14 Contoh perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit).

Tabel 1. Hasil perhitungan titik batas (beban batas) proporsional dan ultimit, dan rasio daktilitas balok.

Benda Uji	P_y (kN)	d_y (mm)	P_u (kN)	D_u (mm)	μ
BG-01	10,51	5,97	12,49	7,65	1,28
BG-02	12,14	8,62	13,74	10,54	1,22
BG-03	8,66	7,44	9,98	9,93	1,33
rerata	10,43	7,34	12,07	9,37	1,28

Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1. Hasil Tabel 1 memperlihatkan bahwa rasio daktilitas peralihan balok rata-rata adalah sebesar 1,28. Beban batas proporsional rata-rata adalah sebesar 10,43 kN, beban batas ultimit rata-rata adalah sebesar 12,07 kN. Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2 Persamaan 3, dan Persamaan 4 dilakukan perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2.

Perhitungan modulus penampang elastik dan tegangan lentur dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Hasil Tabel 2 memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayui laminasi-lem rata-rata adalah 20,38 MPa,

sedangkan kekuatan lentur balok utuh sesuai referensi Atlas Kayu Indonesia adalah sebesar 37,96 MPa. Maka diperoleh rasio modulus penampang elastik balok rata-rata adalah sebesar 0,54.

Tabel 2. Hasil perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi.

Benda Uji	M_y (kN.mm)	f_{b-lam} (MPa)	f_b (MPa)	k_s
BG-01	5250,71	20,51	37,96	0,54
BG-02	6067,72	23,70	37,96	0,62
BG-03	4329,69	16,91	37,96	0,45
rerata	5216,04	20,38	37,96	0,54

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian adalah kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh, yaitu rasio modulus penampang elastik sebesar 0,54, rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28 sehingga termasuk dalam kriteria daktilitas terbatas, hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur. Parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan *serviceability*,

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan pada Universitas Kristen Maranatha melalui Hibah Penelitian Internal sehingga penulis dapat mengadakan pengujian, dan melakukan kegiatan penelitian tanpa kendala. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Eki Romario, Diego Jundo Banjar Nahor, dan Muhammad Maruf sehingga proses pembuatan benda uji dan pengujian dapat berjalan dengan lancar di Laboratorium Struktur,

DAFTAR PUSTAKA

American Society for Testing and Materials (2014), ASTM D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, PA,

American Society for Testing and Materials (2015), ASTM D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

Anshari, B., Z. W. Guan, A. Kitamori, K. Jung and K. Komatsu (2012). "Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood." *Construction and Building Materials*, 29(0): pp. 24-32.

Chauf, K.A., Dewi, S.M. (2016), Structural Efficiency and Flxure Strength of Mix-Glulam Timber Beams Are Composed of Sengon And Coconut Wood As Green Material Constructions, The 2nd International Multidisciplinary Conference, Indonesia, 2016.

Ezeagu, C.A., Eromosele, A.F., Okoro, H., Chukwujekwu, U.J., Emetomo, T.B. (2015), Flexural Strength of Solid and Glue-Laminated Timber Beams, *American Journal of Engineering Science and Technology Research*, Vol. 3, No. 1, September 2015, pp. 1-14.

Gere, J.M., Goodno, B.J, (2018), *Mechanics of Materials* (Eighth Edition), ISBN: 978-1-337-09334-7, Cengage Learning, 20 Channel Center Street, Boston, MA 02210, USA,

Jockwer, R. (2016), Load-carrying capacity and failure modes of glulam beams with reinforced notches, *European Journal of Wood and Wood Products*, Volume 74, Issue 3, pp 481–482.

Khadafi, M., Anshari, B., Fajrin, J. (2018), Experimental Investigation on Flexural Properties of Glulam Timber Beam Reinforced by Bamboo Strips, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* Volume 9, Issue 5, May 2018, pp. 69–76.

Massaro, F.M. (2019), Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain, *European Journal of Wood and Wood Products*, Volume 77, Issue 5, pp 821–832

Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., Quenneville, P, (2010), Determination of Yield Point and Ductility of Timber Assemblies: In Search for a Harmonized Approach, *Engineered Wood Products Association*,

Pranata, Y.A., Milyardi, R., Silvanus, J.H., Yuliana, S.I., Lekalette, C.T., (2019), Behavior of Laminated-Timber Slab Using Mechanical Connector, *Lecture Notes in Civil Engineering*, Volume 19 Year 2012, pp. 47-55, Springerlink.

Pranata Y,A,, Suryoatmono, B, (2019), Struktur Kayu Analisis dan Desain Dengan LRFD, Penerbit PT, Remaja Rosdakarya, ISBN 978-602-446-303-8,

Pranata Y,A,, Suryoatmono, B,, Tjondro, J,A, (2011), The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam, *Prosiding The 3rd European Asian Civil Engineering Forum*, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia.

Pranata Y,A,, Suryoatmono, B,, Tjondro, J,A, (2012),
Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu
Laminasi-Baut, Jurnal Teknik Sipil, Volume 19
Nomor 3, Desember 2012, pp 223-236.

Puslitbang Teknologi Hasil Hutan (2004), Atlas
Kayu Indonesia, Badan Penelitian dan

Pengembangan Kehutanan, Departemen
Kehutanan,

Umaima, M.C.K., Arya, R. (2015), Analytical Study
on Flexural Behaviour of Glued Laminated
Timber, International Journal of Innovative
Research in Science, Engineering and
Technology Vol. 4, Issue 4, April 2015.

MODULUS PENAMPANG ELASTIK BALOK KAYU JABON *GLULAM*

Elastic Section Modulus of Glulam Jabon Timber Beams

Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto, Aan Darmawan

Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Suria Sumantri 65 Bandung, 40164, Jawa Barat

E-mail: yosafat.ap@gmail.com, anang.kristianto@gmail.com, valfa007@gmail.com

Article history:

Received date:

Received in revised form date:

Accepted date:

Available online date:

Abstrak

Modulus penampang elastik balok merupakan salah satu parameter yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan balok, secara khusus berhubungan dengan momen inersia penampang. Modulus penampang elastik balok kayu utuh (solid) tidak sama dengan balok kayu laminasi untuk studi kasus balok dengan ukuran penampang sama, hal ini dikarenakan momen inersia penampang balok laminasi perhitungannya berbeda dengan balok utuh akibat adanya slip antar lamina pada saat beban bekerja serta besarnya modulus elastisitas yang tidak sama pada setiap lamina, sehingga perilaku lentur balok menjadi satu kesatuan dalam kaitannya dengan kekuatan balok. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari modulus penampang elastik balok kayu laminasi lem (*glulam*). Ruang lingkup penelitian yaitu benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.) ukuran penampang 60x160 mm, jumlah lamina 4 (empat), sistem laminasi menggunakan lem super adhesive, pengujian lentur menggunakan metode four-point loading test, perilaku lentur yang ditinjau adalah kekuatan lentur, modulus penampang elastik, dan rasio daktilitas balok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa modulus penampang elastik dan tegangan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh dengan rasio sebesar 0,54, serta rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28 sehingga termasuk dalam kriteria daktilitas terbatas. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur. Parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan serviceability.

Kata Kunci : Rigiditas lentur, balok, laminasi, lem, Jabon.

Abstract

The elastic cross-section modulus of the beam is one of the parameters related to the strength and stiffness of the beam, specifically related to the inertia moment of the cross-section. The elastic cross-section modulus of solid timber beam is not the same as laminated timber beam for the case study of beam with the same cross-section size, this is because the inertia moment of cross-section of the laminated beam calculation is different from the solid beam due to slippage between lamina when the load is working and the magnitude of the elastic modulus which is not the same in every lamina, so that the flexural behavior of the beam becomes a single unit in relation to the strength of the beam. The purpose of this study was to study the elastic cross-section modulus of glue-laminated wood (*glulam*). The scope of the study is the beam test object made of Jabon wood (*Anthocephalus cadamba* Miq.) 60x160 mm cross-section size, 4 (four) lamina numbers, lamination system using super adhesive glue, flexural testing using the four-point loading test method, the flexural behavior that is reviewed are flexural strength, elastic cross-section modulus, and beam ductility ratio. The results showed that the elastic cross-section modulus and the flexural stress of the laminated timber beams were lower than the solid timber beams with a ratio of 0.54, and the ductility ratio of the laminated wooden beams was 1.28 so that they were categorized in the limited ductility criteria. The test results indicate that the failure of glue-laminated timber beams is a failure of bending. The elastic modulus cross-section parameters of laminated timber beams are useful for the design of beam structure components in buildings, especially in the calculation of beam strength and beam stiffness as a serviceability requirement.

Keywords : Flexural rigidity, beam, laminated, glue, Jabon.

PENDAHULUAN

Balok laminasi lem atau Glulam (*glue-laminated*) merupakan balok yang disusun dari dua atau lebih lamina kayu dan dirangkai secara vertikal, horisontal, atau kombinasi silang, sehingga didapatkan penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan. Sistem laminasi bermanfaat untuk mengatasi permasalahan keterbatasan dimensi bahan kayu yang ada. Sistem perekatan dilakukan dengan menggunakan lem yang telah diuji kekuatan gesernya sehingga slip antar lamina kayu dapat direduksi seminimal mungkin.

Salah satu manfaat balok laminasi adalah dapat menghasilkan ukuran penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan dari dua atau lebih lamina-lamina kayu, sebagai contoh balok kayu ukuran penampang 60 mm x 40 mm apabila disusun sebanyak empat lamina maka akan menghasilkan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Masing-masing lamina tersebut direkatkan menggunakan perekat/lem.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan pengujian lentur balok kayu laminasi lem (glulam) untuk mendapatkan data empiris parameter modulus penampang elastik.

Parameter modulus penampang elastik diperlukan khususnya untuk perhitungan kekuatan lentur (F_b) balok dengan penampang tidak solid, sebagai contoh balok laminasi. Kekuatan lentur merupakan salah satu parameter utama terkait analisis dan desain balok (komponen struktur lentur) pada bangunan gedung.

Perkembangan penelitian balok kayu laminasi lem (*glulam*) sudah sangat pesat. Dimulai dari penelitian untuk mempelajari perilaku lentur balok, penelitian terkait rigiditas balok, penelitian variasi jenis kayu, penelitian variasi sistem laminasi yang digunakan, penelitian terkait usulan metode-metode perkuatan untuk meningkatkan kinerja lentur, sampai dengan penelitian untuk mengetahui kinerja dan perilaku lentur akibat beban jangka panjang.

Penelitian sebelumnya terkait perilaku dan kekuatan lentur balok kayu laminasi telah dilakukan oleh Kamiya (Kamiya, 1985), oleh Bohnhoff dkk. (Bohnhoff dkk., 1989), dan oleh Gliniorz dkk. (Gliniorz dkk., 2002) dengan hasil secara umum kekuatan lentur lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh.

Penelitian terkait perbandingan kekuatan lentur balok kayu utuh dan balok kayu laminasi lem telah dilakukan oleh Ezeagu dkk. (Ezeagu dkk., 2015)

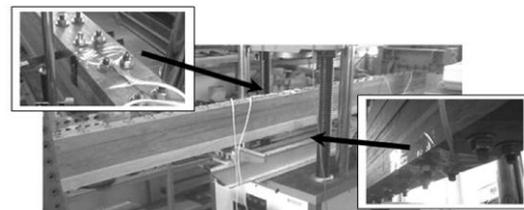
untuk kayu jenis daun jarum (*softwood*). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah berkisar 37%-66% dibandingkan dengan kayu utuh. Dari segi manfaat, kayu laminasi lem memberikan manfaat dimensi dan ukuran penampang yang lebih besar.



Gambar 1 Pengujian Balok Kayu Laminasi Oleh Ezeagu dkk. (Ezeagu dkk., 2015).

Penelitian kekuatan lentur balok laminasi lem dengan pendekatan analitis dan numerik telah dilakukan oleh Umaima dan Arya (Umaima dan Arya, 2015), balok menggunakan sistem laminasi horizontal dengan variasi ketebalan lamina yang berbeda-beda. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ketebalan lamina tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lentur balok laminasi.

Penelitian terkait rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata dkk. (Pranata dkk., 2011; Pranata dkk., 2012) yaitu sistem laminasi mekanik menggunakan alat sambung baut. Penelitian dilakukan terhadap 6 (enam) jenis kayu Indonesia. Hasil penelitian secara umum memperlihatkan bahwa rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi-baut berkisar antara 0,38-0,91. Rasio modulus penampang elastik (S) balok laminasi mekanik dapat mencapai kondisi rasio 0,91 terhadap balok utuh, hal ini dapat tercapai dengan spasi antar baut 100 mm, sehingga pada saat balok dibebani lentur, slip yang terjadi antar lamina dapat berkurang, sehingga momen inersia penampang balok laminasi mendekati momen inersia penampang balok utuh.



Gambar 2 Penelitian Terkait Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi Mekanis (Pranata dkk., 2012).

Penelitian kekuatan lentur sistem laminasi-baut dengan orientasi arah laminasi vertikal juga telah

dilakukan oleh Pranata dkk. (Pranata dkk., 2019). Tujuan orientasi sistem lamina pada arah vertikal adalah untuk mendapatkan dimensi lebar (b) yang lebih besar dan bermanfaat sebagai sistem struktur lantai (*slab*) bangunan bertingkat. Hasil penelitian membahas tentang kekuatan lentur sistem laminasi akibat beban gravitasi dan perilaku struktur lantai akibat beban getaran.

Penelitian balok laminasi lem (*glulam*) dengan kombinasi lebih dari satu jenis kayu telah dilakukan oleh Chauf dan Dewi (Chauf dan Dewi, 2016) dengan hasil penelitian adalah diperoleh model struktur laminasi yang efisien dan kekuatan lentur yang optimal dengan tipe kegagalan yaitu getas.

Penelitian perilaku lentur balok laminasi lem akibat beban jangka panjang (*long-term behavior*) telah dipelajari oleh Massaro (Massaro, 2019) untuk jenis kayu *Norway Spruce*. Penelitian dilakukan dengan pendekatan pengujian eksperimental dan analisis numeric.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi eksperimental di laboratorium. Secara umum tahapan penelitian terdiri dari 4 (empat) tahap, yaitu tahap pertama studi literatur terkait modulus elastisitas balok kayu, rigiditas lentur balok kayu, kayu laminasi lem, serta tata cara pengujian lentur kayu berdasarkan ASTM. tahap kedua yaitu pembuatan benda uji balok kayu laminasi lem. Tahap ketiga adalah pengujian eksperimental di laboratorium. Tahap keempat adalah proses mengolah data kurva kapasitas lentur balok yaitu kurva hubungan beban versus peralihan menjadi parameter rigiditas lentur balok kayu laminasi, kekuatan lentur balok kayu laminasi, dan rasio daktilitas peralihan balok.

Ruang lingkup penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba Miq.*).
2. jumlah lamina 4 (empat), dengan ukuran masing-masing lamina adalah 60 mm x 40 mm, sehingga membentuk ukuran penampang balok 60 mm x 160 mm.
3. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* yaitu Jenis *Strong Epoxy*.
4. Metode perekatan adalah metode *press* pada sistem laminasi kayu dengan menggunakan dudukan pelat dan alat pengencang baut, teknik pengencangan baut menggunakan metode *snug tight* sesuai AISC 360-16 (AISC, 2016).

5. Jumlah benda uji adalah 3 (tiga) buah benda uji balok. Panjang balok (jarak antar tumpuan) adalah 1500 mm.
6. Pengujian lentur mengacu pada standar ASTM D198 (ASTM, 2015) dengan metode pengujian destruktif *four-point bending test*.
7. Perilaku lentur yang ditinjau adalah modulus penampang elastik, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok..

Balok kayu laminasi lem (Glulam)

Glulam adalah susunan beberapa lapis kayu direkatkan satu sama lain menjadi satu kesatuan dengan mereduksi kemungkinan terjadinya diskontinuitas atau slip antar lamina. Sistem laminasi merupakan salah satu upaya menghasilkan desain penampang balok kayu yang ekonomis dan memenuhi prinsip struktural.

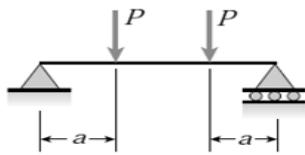
Perekat merupakan material dengan sifat dominan berupa kimiawi. Lamina-lamina kayu yang direkatkan oleh lem akan memungkinkan berdampak pada perubahan sifat mekanis kayu, khususnya kekakuan dan kekuatan lentur. Apabila balok disusun dengan jumlah lamina yang semakin banyak, maka semakin besar pula luas bidang rekatan, sehingga dampaknya berkaitan pula dengan tipe perekat terhadap kinerja kekakuan dan kekuatan.

Deformasi balok

Modulus elastisitas adalah kemiringan proporsional garis linier dari kurva hubungan beban dan deformasi (dalam rentang beban elastik), dalam konteks ini adalah beban lentur pada balok dan deformasi adalah lendutan balok akibat adanya beban yang bekerja. Untuk kondisi balok sederhana dengan beban 2 (dua) buah terpusat pada masing-masing jarak sejauh a dari tumpuan masing-masing seperti ilustrasi pada Gambar 3, maka hubungan deformasi terhadap beban dinyatakan dalam Persamaan 1 (Gere dan Goodno, 2018).

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

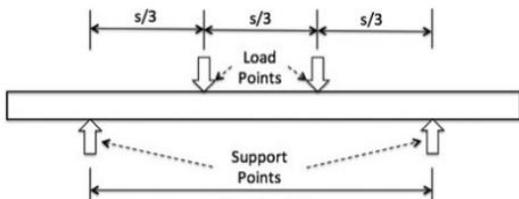
dengan δ adalah deformasi, P adalah beban terpusat pada jarak a dari tumpuan, L adalah panjang bentang balok dari tumpuan-ke-tumpuan, E (atau MoE) adalah modulus elastisitas balok kayu (arah longitudinal), dan I adalah momen inersia penampang balok.



Gambar 3 Balok Dengan Beban 2 Buah Beban P Pada Jarak Sebesar a Dari Masing-Masing Tumpuan (Gere dan Goodno, 2018).

Pengujian lentur kayu

Benda uji lentur kayu untuk pengujian sifat mekanika lentur dapat dibuat berdasarkan acuan spesifikasi benda uji primer dan benda uji sekunder sesuai standar ASTM D143 (ASTM, 2014). Metode pengujian lentur dapat mengacu sesuai metode pengujian *center-point loading test* ASTM D143 (ASTM, 2014) atau metode pengujian *four-point loading test* ASTM D198 (ASTM, 2015). Kecepatan pembebanan (*crosshead*) untuk keperluan uji lentur adalah adalah 2,5 mm/menit. Gambar 4 memperlihatkan skematik metode pengujian lentur dengan metode *four-point loading test*.



Gambar 4 Metode Pengujian *Four-Point Loading Test* (ASTM, 2015).

Kekuatan lentur adalah kekuatan batas proporsional yang dapat dicapai kayu ketika komponen kayu tersebut mengalami kegagalan akibat momen lentur, sedangkan pada kondisi kekuatan batas ultimit disebut *Modulus of Rupture* (MoR). Kekuatan lentur pada kondisi beban batas proporsional (f_B) dapat dihitung dengan menggunakan dasar teori tegangan normal-lentur sesuai Persamaan 2.

$$f_B = \frac{M \cdot y}{I} \tag{2}$$

Parameter f_B adalah kekuatan lentur pada kondisi beban batas (titik batas) proporsional, M adalah momen lentur akibat beban yang bekerja, dan y adalah jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar penampang balok.

Berdasarkan metode ASTM D143 (ASTM, 2014), maka kriteria kegagalan lentur balok terdiri dari beberapa klasifikasi sesuai kondisi retak yang terjadi. Klasifikasi kegagalan balok salah satunya adalah *simple tension*, yaitu terjadi retak pada serat

terluar bagian tarik kemudian retak menjalar pada arah sejajar serat.

Modulus penampang elastik

Modulus penampang elastik (S) adalah momen inersia penampang balok (I) dibagi dengan jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar (y) dalam rentang beban batas elastik.

$$S = \frac{I}{y} \tag{3.a}$$

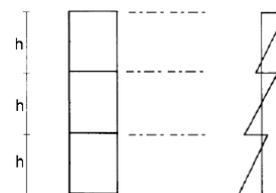
$$S_{eff} = k_s \cdot S \tag{3.b}$$

Persamaan 2 selanjutnya dapat ditulis,

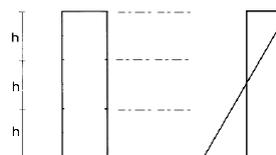
$$f_B = \frac{M}{S} \tag{4.a}$$

$$f_{B-lam} = \frac{M}{S_{eff}} \tag{4.b}$$

S_{eff} adalah modulus penampang elastik balok laminasi dan k_s adalah rasio modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok utuh. Sedangkan f_{B-lam} adalah kekuatan lentur balok laminasi (Pranata dkk., 2012).



(a). Balok laminasi (Pranata dkk., 2012).



(b). Balok dengan penampang *solid*.

Gambar 5 Skematik ilustrasi perilaku lentur balok laminasi dan balok dengan penampang utuh.

Perilaku slip antar lamina terjadi karena kompatibilitas regangan antara lem dan lamina tidak bekerja sempurna sehingga perilaku lentur balok laminasi tidak seperti balok utuh, tetapi tetap terjadi interaksi parsial antar lamina, ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 5.a (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok laminasi) dan Gambar 5.b (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok utuh).

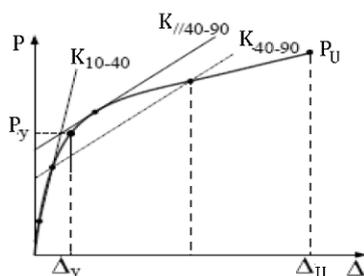
Persamaan 5 merupakan pengembangan dari Persamaan 1 khususnya untuk perhitungan deformasi balok kayu laminasi dengan beban yaitu P_{lam} maka besarnya rigiditas lentur balok laminasi sebesar k_{EI} lebih rendah dibandingkan rigiditas lentur balok berpenampang utuh (*solid*). k_{EI} dalam hal ini adalah rasio rigiditas lentur balok kayu laminasi-lem (*glulam*).

$$\delta = \frac{P_{lam} a}{24(k_{EI} \cdot E \cdot I)} (3L^2 - 4a^2) \quad (5)$$

Metode penentuan titik batas proporsional dan titik batas ultimit

Hasil pengujian eksperimental adalah berupa kurva hubungan beban versus deformasi, yaitu secara umum terdapat 2 kondisi pembebanan yang pertama kondisi rentang beban elastik dan kondisi beban pasca-elastik. Hal ini memerlukan metode untuk menentukan titik batas (beban batas) proporsional. Berdasarkan hasil penelitian Munoz dkk. (Munoz dkk., 2010) maka terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan titik batas proporsional yaitu metode CEN, metode CSIRO, metode Karacabeyli dan Ceccotti, metode Yasumura dan Kawai, metode EEEP dan metode Offset 5%. Masing-masing metode diperuntukkan untuk tipe pengujian eksperimental properti mekanika kayu yang berbeda-beda.

Metode Yasumura dan Kawai banyak disarankan sebagai metode yang paling relevan untuk material kayu, prinsip dasar yaitu kekakuan inisial dihitung pada kondisi 10%, 40%, dan 90% titik batas (beban batas) ultimit (P_U). Rentang kondisi elastik ditentukan dari pertemuan dua garis, yaitu garis pertama adalah garis linier yang menghubungkan antara garis yang terbentuk dari pertemuan titik 10%- P_U dan 40%- P_U , sedangkan garis kedua adalah yang terbentuk dari pertemuan titik 40%- P_U dan 90%- P_U yang telah digeser sejajar sampai berimpit pada kurva beban-deformasi hasil pengujian. Ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Ilustrasi metode Yasumura dan Kawai (Munoz dkk., 2010).

Kekuatan lentur dan keawetan kayu Jabon

Dalam penelitian ini digunakan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba Miq.*). Kayu Jabon banyak ditemui di berbagai pulau di Indonesia. Berdasarkan Atlas Kayu Indonesia (PTHH, 2004), kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas kuat III-IV dengan rentang berat jenis berkisar antara 290-560 kg/m³. Pada kondisi kering, kekuatan lentur (F_b) kayu Jabon pada kondisi batas proporsional adalah 37,96 MPa dan pada kondisi batas ultimit (*Modulus of Rupture* atau MoR) adalah 67,79 MPa. Modulus elastisitas (E atau MoE) kayu Jabon adalah 6670,80 MPa.

Dalam kaitannya dengan keawetan kayu sebagai komponen penyusun bangunan gedung, terutama terhadap serangan rayap kayu, kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas II, sedangkan daya tahan terhadap serangan jamur pelapuk kayu termasuk dalam kategori kelas IV-V. secara umum kayu Jabon termasuk dalam kategori keterawetan kelas sedang.

Modulus Elastisitas Dinamik

Metode pengujian tidak merusak (non-destruktif) khususnya untuk pengujian material kayu merupakan salah satu metode untuk mendapatkan data empiris parameter Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) yang dihitung berdasarkan hubungan dengan berat jenis kayu (ρ , satuan kg/m³) dan kecepatan gelombang (v , satuan m/detik), yaitu menggunakan Persamaan 6 (CBS-CBT, 2011).

$$E_{dyn} = \rho V^2 10^{-6} \quad (6)$$

Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) dan Modulus Elastisitas (E) telah dipelajari sebelumnya antara lain oleh Raymond dkk. (Raymond dkk., 2007), Benoit dkk. (Benoit dkk., 2011), Nowak (Nowak, 2015), dan Poggi (Poggi, 2017). Raymond (Raymond dkk., 2007) dalam penelitiannya menyampaikan hubungan antara Modulus Elastisitas dengan Modulus Elastisitas Dinamik yang dinyatakan dalam Persamaan 7 sebagai berikut,

$$E = 0,899 E_{dyn} \quad ; \quad R^2 = 0,93 \quad (7)$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian balok kayu laminasi lem dengan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba Miq.*). Lamina kayu mempunyai ukuran penampang 60 mm x 40 mm, sistem laminasi yang digunakan adalah horisontal dengan jumlah lamina sebanyak 4 (empat) lamina,

sehingga terbentuk balok dengan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* jenis *Strong Epoxy*. Perilaku lentur yang ditinjau adalah rigiditas lentur, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok. Proses pembuatan benda uji meliputi pemilahan kayu, pembuatan lamina kayu, dan pembuatan balok laminasi dengan lem.

Gambar 7 memperlihatkan proses pengukuran kadar air untuk mengetahui kadar air pada masing-masing lamina kayu. Seluruh benda uji disusun pada kondisi kadar air berkisar 7,0 % s.d. 11,5 %. Hasil ini memperlihatkan bahwa kayu dalam kondisi kering mengacu pada peraturan kayu Indonesia SNI 7973:2013 (BSN, 2013).



Gambar 7 Proses pengukuran kadar air pada lamina kayu.

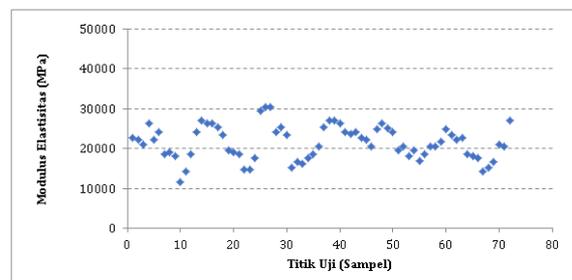
Gambar 8 memperlihatkan proses pemilahan kayu, yaitu pengujian sifat mekanika kayu Modulus Elastisitas masing-masing lamina kayu. Metode yang digunakan adalah uji non-destruktif (uji tidak merusak) dengan metode *direct measurement* dengan menggunakan alat uji Sylvatest TRIO (CBS-CBT, 2011). Metode *direct measurement* merupakan salah satu metode pengukuran tidak merusak pada material kayu yang diperkenalkan oleh Benoit dkk (Benoit dkk., 2011; CBS-CBT 2011) dengan alat ukur Sylvatest DUO yang dalam perkembangannya ditingkatkan kemampuannya dan mengalami perubahan nama alat ukur Sylvatest TRIO. Metode uji tidak merusak pada kayu Indonesia telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata dan Tobing (Pranata dkk., 2016) yaitu penelitian sifat mekanika kayu Rumah Tradisional Minangkabau, serta oleh Pranata dan Rusli (Pranata dkk., 2019) yaitu penelitian sifat mekanika Rumah Tradisional Minahasa.

Dalam penelitian ini benda uji berjumlah 3 balok dan masing-masing balok terdiri dari 4 lamina kayu, sehingga jumlah kayu yang digunakan adalah 12 batang. Seluruh batang selanjutnya diuji dengan menggunakan pengujian non-destruktif, dengan masing-masing batang diuji pada 6 titik sampel. Total titik uji adalah 72 titik sampel.



Gambar 8 Proses pengujian non-destruktif untuk mendapatkan sifat mekanika Modulus Elastisitas Dinamik.

Hasil pengujian non-destruktif selengkapnya ditampilkan pada Gambar 9. Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamik dilakukan dengan menggunakan Persamaan 6 dengan berat jenis kayu Jabon yaitu 425 kg/m³. Selanjutnya perhitungan Modulus Elastisitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan 7. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa Modulus Elastisitas rata-rata lamina kayu adalah 21433,93 MPa dengan Deviasi Standar sebesar 4145,33 MPa dan Koefisien Variasi sebesar 19,34%. Nilai Koefisien Variasi yang diperoleh adalah kurang dari 25% (BSN, 2013) sehingga secara umum seluruh batang kayu dapat digunakan sebagai lamina kayu. Data empiris modulus elastisitas yang diperoleh selanjutnya menjadi acuan bagi penyusunan lamina-lamina kayu pada balok laminasi.



Gambar 9 Hasil pengujian non-destruktif: Modulus Elastisitas (E) dengan satuan MPa.

Gambar 10 memperlihatkan proses pengujian salah satu benda uji balok kayu laminasi.



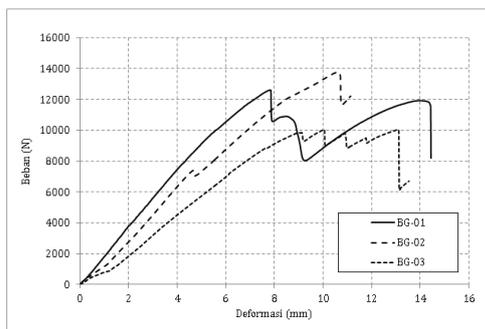
Gambar 10 Proses pengujian balok laminasi benda uji.

Metode pengujian adalah *four-point loading test* dengan jarak a sebesar 500 mm (1/3 bentang balok). Selanjutnya Gambar 11 memperlihatkan ragam kegagalan balok yang terjadi pada benda uji yaitu *simple tension*, hal ini sesuai dengan salah satu model kegagalan benda uji lentur berdasarkan ASTM D143 (ASTM, 2014) sehingga kegagalan yang diharapkan terjadi sesuai dengan hasil pengujian.



Gambar 11 Ragam kegagalan balok yang terjadi untuk seluruh benda uji yaitu *simple tension*.

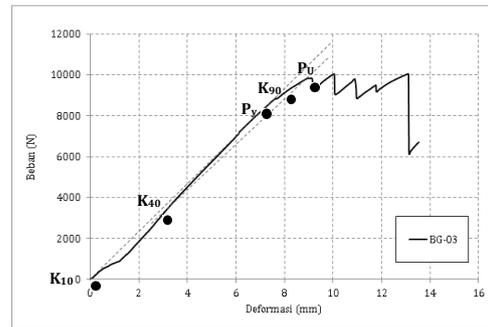
Gambar 12 memperlihatkan kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok. Hasil pengujian seluruh benda uji memperlihatkan trend kurva yang hampir sama, deformasi maksimum berkisar antara 7,65 mm s.d. 10,54 mm, beban maksimum berkisar antara 9,98 kN s.d. 13,74 kN.



Gambar 12 Kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok.

Gambar 13 memperlihatkan contoh perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit). Perhitungan titik batas proporsional (P_y) menggunakan literature Munoz dkk. (Munoz dkk., 2010) dengan menggunakan Metode Yasumura dan Kawai.

Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1. Hasil Tabel 1 memperlihatkan bahwa rasio daktilitas peralihan balok rata-rata adalah sebesar 1,28. Beban batas proporsional rata-rata adalah sebesar 10,43 kN, beban batas ultimit rata-rata adalah sebesar 12,07 kN.



Gambar 13 Perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit) pada Benda Uji BG-03.

Tabel 1. Hasil perhitungan titik batas (beban batas) proporsional dan ultimit, dan rasio daktilitas balok.

Benda Uji	P_y (kN)	d_y (mm)	P_u (kN)	D_u (mm)	μ
BG-01	10,51	5,97	12,49	7,65	1,28
BG-02	12,14	8,62	13,74	10,54	1,22
BG-03	8,66	7,44	9,98	9,93	1,33
rerata	10,43	7,34	12,07	9,37	1,28

Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2 Persamaan 3, dan Persamaan 4 dilakukan perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi.

Benda Uji	M_y (kN.mm)	f_{b-lam} (MPa)	f_b (MPa)	k_s
BG-01	5250,71	20,51	37,96	0,54
BG-02	6067,72	23,70	37,96	0,62
BG-03	4329,69	16,91	37,96	0,45
rerata	5216,04	20,38	37,96	0,54

Perhitungan modulus penampang elastik dan tegangan lentur dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Hasil Tabel 2 memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu laminasi-lem rata-rata adalah 20,38 MPa, sedangkan kekuatan lentur balok utuh sesuai referensi Atlas Kayu Indonesia adalah sebesar 37,96 MPa. Maka diperoleh rasio modulus penampang elastik balok rata-rata adalah sebesar 0,54.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian adalah kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh, dalam penelitian ini diperoleh rasio modulus penampang elastik sebesar 0,54, rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28.

Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur mengacu pada kriteria kegagalan lentur sesuai ASTM D143.

Parameter modulus penampang elastik (S) balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan *serviceability*. Dalam peraturan kayu Indonesia, parameter tersebut digunakan untuk perhitungan kekuatan lentur terkoreksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan pada Universitas Kristen Maranatha melalui Hibah Penelitian Internal sehingga penulis dapat mengadakan pengujian, dan melakukan kegiatan penelitian tanpa kendala. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fernando Salim, Christianto, Eki Romario, Diego Jundo Banjar Nahor, Muhammad Maruf, dan Stefanny Abigail sehingga proses pembuatan benda uji dan pengujian dapat berjalan dengan lancar di Laboratorium Struktur,

DAFTAR PUSTAKA

American Institute of Steel Construction (2016), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16, USA.

American Society for Testing and Materials (2014), ASTM D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (2015), ASTM D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Badan Standardisasi Nasional (2013). Spesifikasi Desain untuk Kontruksi Kayu SNI 7973:2013, Badan Standardisasi Nasional.

Benoit, Y., Sandoz, J.L. (2011). New Wooden Poles Grading Using Non-Destructive.

Bohnhoff, D.R., Cramer, S.M., Moody, R.C., Cramer, C.O. (1989), Modeling Vertically, Mechanically

Laminated Lumber, ASCE Journal of Structural Engineering, Volume 115 No 10 page 2661-2679, October 1989.

CBS-CBT (2011). Sylvatest TRIO User Manual, CBS-CBT.

Technology, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, June 6th-9th, 2011.

Chauf, K.A., Dewi, S.M. (2016), Structural Efficiency and Flxure Strength of Mix-Glulam Timber Beams Are Composed of Sengon And Coconut Wood As Green Material Constructions, The 2nd International Multidisciplinary Conference, Indonesia, 2016.

Ezeagu, C.A., Eromosele, A.F., Okoro, H., Chukwujekwu, U.J., Emetomo, T.B. (2015), Flexural Strength of Solid and Glue-Laminated Timber Beams, American Journal of Engineering Science and Technology Research, Vol. 3, No. 1, September 2015, pp. 1-14.

Gere, J.M., Goodno, B.J. (2018), Mechanics of Materials (Eighth Edition), ISBN: 978-1-337-09334-7, Cengage Learning, 20 Channel Center Street, Boston, MA 02210, USA.

Gliniorz, K.U., Mosalam, K.M., Natterer, J. (2002), Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks, Journal of Composites Part B: Engineering, Elsevier.

Jockwer, R. (2016), Load-carrying capacity and failure modes of glulam beams with reinforced notches, European Journal of Wood and Wood Products, Volume 74, Issue 3, pp 481–482.

Kamiya, F. (1985), Analytical Studies on The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams, Journal of Wood and Fiber Science, Volume 17 No 1 page 117-131, 1985.

Khadafi, M., Anshari, B., Fajrin, J. (2018), Experimental Investigation on Flexural Properties of Glulam Timber Beam Reinforced by Bamboo Strips, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 9, Issue 5, May 2018, pp. 69–76.

Massaro, F.M. (2019), Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain, European Journal of Wood and Wood Products, Volume 77, Issue 5, pp 821–832.

Munoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A., Quenneville, P. (2010), Determination of Yield Point and Ductility of Timber Assemblies: In Search for a Harmonized Approach, Engineered Wood Products Association.

Nowak, T.P. (2015). Experimental Testing Of Glued Laminated Timber Members Using Ultrasonic And Stress Wave Techniques, 3rd

- International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures SHATIS 2015.
- Poggi, F. (2017). Bending properties of commercial wood-based panels by NDT methods.
- Pranata, Y.A., Milyardi, R., Silvanus, J.H., Yuliana, S.I., Lekalette, C.T., (2019), Behavior of Laminated-Timber Slab Using Mechanical Connector, Lecture Notes in Civil Engineering, Volume 19 Year 2012, pp. 47-55, Springerlink.
- Pranata, Y.A., Rusli, M, (2019), Non-Destructive Testing Of The Existing Timber Columns Of Minahasa Traditional House, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 10 No 10, October 2019, pp. 313-322, ISSN Print 0976-6308, ISSN Online 0976-6316, IAEME Publication.
- Pranata Y,A,, Suryoatmono, B, (2019), Struktur Kayu Analisis dan Desain Dengan LRFD, Penerbit PT, Remaja Rosdakarya, ISBN 978-602-446-303-8.
- Pranata Y,A,, Suryoatmono, B,, Tjondro, J,A, (2011), The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam, Prosiding The 3rd European Asian Civil Engineering Forum, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia.
- Pranata Y,A,, Suryoatmono, B,, Tjondro, J,A, (2012), Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi-Baut, Jurnal Teknik Sipil, Volume 19 Nomor 3, Desember 2012, pp 223-236.
- Pranata, Y.A., Tobing, H.L. (2016). Non-destructive Testing to Obtain the Dynamic Elastic Modulus of the Existing Minangkabau Wooden House, ITP Open Conference Systems, The First International Conference on Technology, Innovation, and Society (ICTIS) 2016.
- Puslitbang Teknologi Hasil Hutan (2004), Atlas Kayu Indonesia, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan.
- Raymond, C.A., Joe, B., Evans, R., Dickson, R.L. (2007). Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and SilviScan properties for Pinus radiata in New South Wales, New Zealand Journal of Forestry Science Volume 37 No 2, pp. 186–196.
- Master thesis in Forestry and Wood Technology, Linnaeus University.
- Umaima, M.C.K., Arya, R. (2015), Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 4, Issue 4, April 2015.

MODULUS PENAMPANG ELASTIK BALOK KAYU JABON GLULAM

Elastic Section Modulus of Glulam Jabon Timber Beams

Yosafat Aji Pranata, Anang Kristianto, Aan Darmawan

Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Suria Sumantri 65 Bandung, 40164, Jawa Barat

Surel: yosafat.ap@gmail.com, anang.kristianto@gmail.com, valfa007@gmail.com

Diterima: 03 Desember 2019 ; Disetujui: 12 Maret 2020

Abstrak

Modulus penampang elastik balok merupakan salah satu parameter yang berkaitan dengan kekuatan dan kekakuan balok, secara khusus berhubungan dengan momen inersia penampang. Modulus penampang elastik balok kayu utuh (solid) tidak sama dengan balok kayu laminasi untuk studi kasus balok dengan ukuran penampang sama, hal ini dikarenakan momen inersia penampang balok laminasi perhitungannya berbeda dengan balok utuh akibat adanya slip antar lamina pada saat beban bekerja serta besarnya modulus elastisitas yang tidak sama pada setiap lamina, sehingga perilaku lentur balok menjadi satu kesatuan dalam kaitannya dengan kekuatan balok. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari modulus penampang elastik balok kayu laminasi lem (glulam). Ruang lingkup penelitian yaitu benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.) ukuran penampang 60x160 mm, jumlah lamina 4 (empat), sistem laminasi menggunakan lem super adhesive, pengujian lentur menggunakan metode four-point loading test, perilaku lentur yang ditinjau adalah kekuatan lentur, modulus penampang elastik, dan rasio daktilitas balok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa modulus penampang elastik dan tegangan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh dengan rasio sebesar 0,54, serta rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28 sehingga termasuk dalam kriteria daktilitas terbatas. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur. Parameter modulus penampang elastik balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan serviceability.

Kata Kunci: Rigiditas lentur, balok, laminasi, lem, jabon

Abstract

The elastic cross-section modulus of the beam is one of the parameters related to the strength and stiffness of the beam, specifically related to the inertia moment of the cross-section. The elastic cross-section modulus of solid timber beam is not the same as laminated timber beam for the case study of beam with the same cross-section size, this is because the inertia moment of cross-section of the laminated beam calculation is different from the solid beam due to slippage between lamina when the load is working and the magnitude of the elastic modulus which is not the same in every lamina, so that the flexural behavior of the beam becomes a single unit in relation to the strength of the beam. The purpose of this study was to study the elastic cross-section modulus of glue-laminated wood (glulam). The scope of the study is the beam test object made of Jabon wood (*Anthocephalus cadamba* Miq.) 60x160 mm cross-section size, 4 (four) lamina numbers, lamination system using super adhesive glue, flexural testing using the four-point loading test method, the flexural behavior that is review are flexural strength, elastic cross-section modulus, and beam ductility ratio. The results showed that the elastic cross-section modulus and the flexural stress of the laminated timber beams were lower than the solid timber beams with a ratio of 0.54, and the ductility ratio of the laminated wooden beams was 1.28 so that they were categorized in the limited ductility criteria. The test results indicate that the failure of glue-laminated timber beams is a failure of bending. The elastic modulus cross-section parameters of laminated timber beams are useful for the design of beam structure components in buildings, especially in the calculation of beam strength and beam stiffness as a serviceability requirement.

Keywords: Flexural rigidity, beam, laminated, glue, jabon

PENDAHULUAN

Balok laminasi lem atau Glulam (*glue-laminated*) merupakan balok yang disusun dari dua atau lebih lamina kayu dan dirangkai secara vertikal, horisontal, atau kombinasi silang, sehingga didapatkan penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan. Sistem laminasi bermanfaat untuk mengatasi permasalahan keterbatasan dimensi bahan kayu yang ada. Sistem perekatan dilakukan dengan menggunakan lem yang telah diuji kekuatan gesernya sehingga slip antar lamina kayu dapat direduksi seminimal mungkin.

Salah satu manfaat balok laminasi adalah dapat menghasilkan ukuran penampang yang lebih besar sesuai kebutuhan dari dua atau lebih lamina-lamina kayu, sebagai contoh balok kayu ukuran penampang 60 mm x 40 mm apabila disusun sebanyak empat lamina maka akan menghasilkan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Masing-masing lamina tersebut direkatkan menggunakan perekat/lem.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan pengujian lentur balok kayu laminasi lem (glulam) untuk mendapatkan data empiris parameter modulus penampang elastik.

Parameter modulus penampang elastik diperlukan khususnya untuk perhitungan kekuatan lentur (F_b) balok dengan penampang tidak solid, sebagai contoh balok laminasi. Kekuatan lentur merupakan salah satu parameter utama terkait analisis dan desain balok (komponen struktur lentur) pada bangunan gedung.

Perkembangan penelitian balok kayu laminasi lem (*glulam*) sudah sangat pesat. Dimulai dari penelitian untuk mempelajari perilaku lentur balok, penelitian terkait rigiditas balok, penelitian variasi jenis kayu, penelitian variasi sistem laminasi yang digunakan, penelitian terkait usulan metode-metode perkuatan untuk meningkatkan kinerja lentur, sampai dengan penelitian untuk mengetahui kinerja dan perilaku lentur akibat beban jangka panjang.

Penelitian sebelumnya terkait perilaku dan kekuatan lentur balok kayu laminasi telah dilakukan oleh Kamiya (1985), Bohnhoff et al. (1989), dan Gliniorz, Mosalam, dan Natterer (2002), dengan hasil secara umum kekuatan lentur lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh.

Penelitian terkait perbandingan kekuatan lentur balok kayu utuh dan balok kayu laminasi lem telah dilakukan oleh Ezeagu et al. (2015) untuk kayu jenis daun jarum (*softwood*). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu

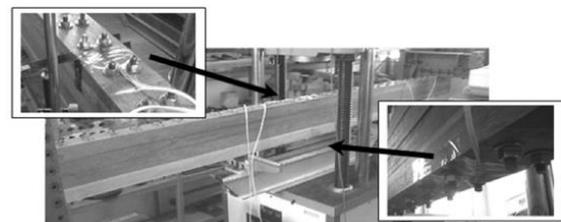
laminasi lem lebih rendah berkisar 37%-66% dibandingkan dengan kayu utuh. Dari segi manfaat, kayu laminasi lem memberikan manfaat dimensi dan ukuran penampang yang lebih besar.



Gambar 1 Pengujian Balok Kayu Laminasi oleh (Ezeagu et al. 2015)

Penelitian kekuatan lentur balok laminasi lem dengan pendekatan analitis dan numerik telah dilakukan oleh Muhammed dan Arya (2015), balok menggunakan sistem laminasi horizontal dengan variasi ketebalan lamina yang berbeda-beda. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa ketebalan lamina tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lentur balok laminasi.

Penelitian terkait rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro (2011; 2012) yaitu sistem laminasi mekanik menggunakan alat sambung baut. Penelitian dilakukan terhadap 6 (enam) jenis kayu Indonesia. Hasil penelitian secara umum memperlihatkan bahwa rasio modulus penampang elastik balok kayu laminasi-baut berkisar antara 0,38–0,91. Rasio modulus penampang elastik (S) balok laminasi mekanik dapat mencapai kondisi rasio 0,91 terhadap balok utuh, hal ini dapat tercapai dengan spasi antar baut 100 mm, sehingga pada saat balok dibebani lentur, slip yang terjadi antar lamina dapat berkurang, sehingga momen inersia penampang balok laminasi mendekati momen inersia penampang balok utuh.



Gambar 2 Penelitian Terkait Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi Mekanis (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012)

Penelitian kekuatan lentur sistem laminasi-baut dengan orientasi arah laminasi vertikal juga telah dilakukan oleh Pranata dan Suryoatmono (2019). Tujuan orientasi sistem lamina pada arah vertikal adalah untuk mendapatkan dimensi lebar (b) yang

lebih besar dan bermanfaat sebagai sistem struktur lantai (*slab*) bangunan bertingkat. Hasil penelitian membahas tentang kekuatan lentur sistem laminasi akibat beban gravitasi dan perilaku struktur lantai akibat beban getaran.

Penelitian balok laminasi lem (*glulam*) dengan kombinasi lebih dari satu jenis kayu telah dilakukan oleh (Chauf dan Dewi 2016) dengan hasil penelitian adalah diperoleh model struktur laminasi yang efisien dan kekuatan lentur yang optimal dengan tipe kegagalan yaitu getas.

Penelitian perilaku lentur balok laminasi lem akibat beban jangka panjang (*long-term behavior*) telah dipelajari oleh Massaro dan Malo (2019) untuk jenis kayu *Norway Spruce*. Penelitian dilakukan dengan pendekatan pengujian eksperimental dan analisis numerik.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi eksperimental di laboratorium. Secara umum tahapan penelitian terdiri dari 4 (empat) tahap, yaitu tahap pertama studi literatur terkait modulus elastisitas balok kayu, rigiditas lentur balok kayu, kayu laminasi lem, serta tata cara pengujian lentur kayu berdasarkan ASTM. tahap kedua yaitu pembuatan benda uji balok kayu laminasi lem. Tahap ketiga adalah pengujian eksperimental di laboratorium. Tahap keempat adalah proses mengolah data kurva kapasitas lentur balok yaitu kurva hubungan beban versus peralihan menjadi parameter rigiditas lentur balok kayu laminasi, kekuatan lentur balok kayu laminasi, dan rasio daktilitas peralihan balok.

Ruang lingkup penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Benda uji balok terbuat dari kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.).
2. Jumlah lamina 4 (empat), dengan ukuran masing-masing lamina adalah 60 mm x 40 mm, sehingga membentuk ukuran penampang balok 60 mm x 160 mm.
3. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* yaitu Jenis *Strong Epoxy*.
4. Metode perekatan adalah metode *press* pada sistem laminasi kayu dengan menggunakan dudukan pelat dan alat pengencang baut, teknik pengencangan baut menggunakan metode *snug tight* sesuai AISC 360-16 (AISC 2016).
5. Jumlah benda uji adalah 3 (tiga) buah benda uji balok. Panjang balok (jarak antar tumpuan) adalah 1500 mm.

6. Pengujian lentur mengacu pada standar ASTM D198 (ASTM 2015), dengan metode pengujian destruktif *four-point bending test*.
7. Perilaku lentur yang ditinjau adalah modulus penampang elastik, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok.

Balok Kayu Laminasi Lem (Glulam)

Glulam adalah susunan beberapa lapis kayu direkatkan satu sama lain menjadi satu kesatuan dengan mereduksi kemungkinan terjadinya diskontinuitas atau slip antar lamina. Sistem laminasi merupakan salah satu upaya menghasilkan desain penampang balok kayu yang ekonomis dan memenuhi prinsip struktural.

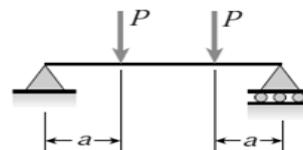
Perekat merupakan material dengan sifat dominan berupa kimiawi. Lamina-lamina kayu yang direkatkan oleh lem akan memungkinkan berdampak pada perubahan sifat mekanis kayu, khususnya kekakuan dan kekuatan lentur. Apabila balok disusun dengan jumlah lamina yang semakin banyak, maka semakin besar pula luas bidang rekatan, sehingga dampaknya berkaitan pula dengan tipe perekat terhadap kinerja kekakuan dan kekuatan.

Deformasi balok

Modulus elastisitas adalah kemiringan proporsional garis linier dari kurva hubungan beban dan deformasi (dalam rentang beban elastik), dalam konteks ini adalah beban lentur pada balok dan deformasi adalah lendutan balok akibat adanya beban yang bekerja. Untuk kondisi balok sederhana dengan beban 2 (dua) buah terpusat pada masing-masing jarak sejauh *a* dari tumpuan masing-masing seperti ilustrasi pada Gambar 3, maka hubungan deformasi terhadap beban dinyatakan dalam Persamaan 1 (Goodno dan Gere 2018).

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \dots\dots\dots (1)$$

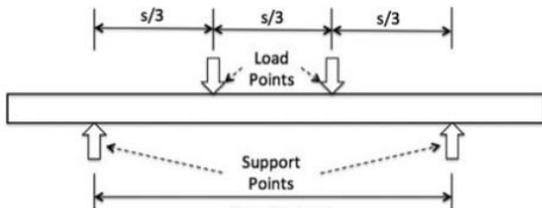
dengan δ adalah deformasi, *P* adalah beban terpusat pada jarak *a* dari tumpuan, *L* adalah panjang bentang balok dari tumpuan-ke-tumpuan, *E* (atau *MoE*) adalah modulus elastisitas balok kayu (arah longitudinal), dan *I* adalah momen inersia penampang balok.



Gambar 3 Balok Dengan Beban 2 Buah Beban *P* Pada Jarak Sebesar *a* Dari Masing-Masing Tumpuan (Goodno dan Gere 2018)

Pengujian lentur kayu

Benda uji lentur kayu untuk pengujian sifat mekanika lentur dapat dibuat berdasarkan acuan spesifikasi benda uji primer dan benda uji sekunder sesuai standar ASTM D143 (ASTM 2014). Metode pengujian lentur dapat mengacu sesuai metode pengujian *center-point loading test* ASTM D143 (ASTM 2014) atau metode pengujian *four-point loading test* ASTM D198 (ASTM 2015). Kecepatan pembebanan (*crosshead*) untuk keperluan uji lentur adalah adalah 2,5 mm/menit. Gambar 4 memperlihatkan skematik metode pengujian lentur dengan metode *four-point loading test*.



Gambar 4 Metode Pengujian *Four-Point Loading Test* (ASTM 2015)

Kekuatan lentur adalah kekuatan batas proporsional yang dapat dicapai kayu ketika komponen kayu tersebut mengalami kegagalan akibat momen lentur, sedangkan pada kondisi kekuatan batas ultimit disebut *Modulus of Rupture* (MoR). Kekuatan lentur pada kondisi beban batas proporsional (f_B) dapat dihitung dengan menggunakan dasar teori tegangan normal-lentur sesuai Persamaan 2.

$$f_B = \frac{M \cdot y}{I} \dots\dots\dots (2)$$

Parameter f_B adalah kekuatan lentur pada kondisi beban batas (titik batas) proporsional, M adalah momen lentur akibat beban yang bekerja, dan y adalah jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar penampang balok.

Berdasarkan metode ASTM D143 (ASTM 2014), maka kriteria kegagalan lentur balok terdiri dari beberapa klasifikasi sesuai kondisi retak yang terjadi. Klasifikasi kegagalan balok salah satunya adalah *simple tension*, yaitu terjadi retak pada serat terluar bagian tarik kemudian retak menjalar pada arah sejajar serat.

Modulus penampang elastik

Modulus penampang elastik (S) adalah momen inersia penampang balok (I) dibagi dengan jarak dari titik berat penampang ke serat tepi terluar (y) dalam rentang beban batas elastik.

$$S = \frac{I}{y} \dots\dots\dots (3.a)$$

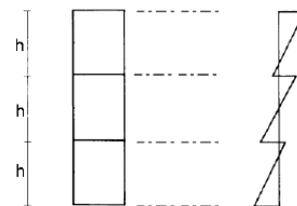
$$S_{eff} = k_s \cdot S \dots\dots\dots (3.b)$$

Persamaan 2 selanjutnya dapat ditulis,

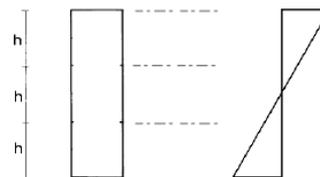
$$f_B = \frac{M}{S} \dots\dots\dots (4.a)$$

$$f_{B-lam} = \frac{M}{S_{eff}} \dots\dots\dots (4.b)$$

S_{eff} adalah modulus penampang elastik balok laminasi dan k_s adalah rasio modulus penampang elastik balok laminasi terhadap balok utuh. Sedangkan f_{B-lam} adalah kekuatan lentur balok laminasi (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012).



(a). Balok laminasi (Pranata, Suryoatmono, dan Tjondro 2012).



(b). Balok dengan penampang *solid*.

Gambar 5 Skematik Ilustrasi Perilaku Lentur Balok Laminasi dan Balok Dengan Penampang Utuh.

Perilaku slip antar lamina terjadi karena kompatibilitas regangan antara lem dan lamina tidak bekerja sempurna sehingga perilaku lentur balok laminasi tidak seperti balok utuh, tetapi tetap terjadi interaksi parsial antar lamina, ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 5.a (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok laminasi) dan Gambar 5.b (distribusi tegangan normal-lentur pada penampang balok utuh).

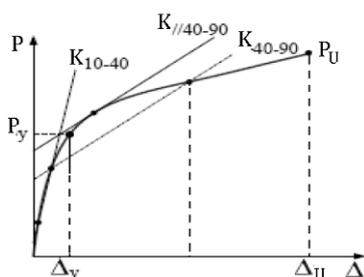
Persamaan 5 merupakan pengembangan dari Persamaan 1 khususnya untuk perhitungan deformasi balok kayu laminasi dengan beban yaitu P_{lam} maka besarnya rigiditas lentur balok laminasi sebesar k_{EI} lebih rendah dibandingkan rigiditas lentur balok berpenampang utuh (*solid*). k_{EI} dalam hal ini adalah rasio rigiditas lentur balok kayu laminasi-lem (*glulam*).

$$\delta = \frac{P_{lam} a}{24(k_{EI} \cdot E \cdot I)} (3L^2 - 4a^2) \dots\dots\dots (5)$$

Metode penentuan titik batas proporsional dan titik batas ultimit

Hasil pengujian eksperimental adalah berupa kurva hubungan beban versus deformasi, yaitu secara umum terdapat 2 kondisi pembebanan yang pertama kondisi rentang beban elastik dan kondisi beban pasca-elastik. Hal ini memerlukan metode untuk menentukan titik batas (beban batas) proporsional. Berdasarkan hasil penelitian Muñoz et al. (2008) maka terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menentukan titik batas proporsional yaitu metode CEN, metode CSIRO, metode Karacabeyli dan Ceccotti, metode Yasumura dan Kawai, metode EEEP dan metode *Offset* 5%. Masing-masing metode diperuntukkan untuk tipe pengujian eksperimental properti mekanika kayu yang berbeda-beda.

Metode Yasumura dan Kawai banyak disarankan sebagai metode yang paling relevan untuk material kayu, prinsip dasar yaitu kekakuan inisial dihitung pada kondisi 10%, 40%, dan 90% titik batas (beban batas) ultimit (P_U). Rentang kondisi elastik ditentukan dari pertemuan dua garis, yaitu garis pertama adalah garis linier yang menghubungkan antara garis yang terbentuk dari pertemuan titik 10%- P_U dan 40%- P_U , sedangkan garis kedua adalah yang terbentuk dari pertemuan titik 40%- P_U dan 90%- P_U yang telah digeser sejajar sampai berimpit pada kurva beban-deformasi hasil pengujian. Ilustrasi selengkapnya ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Ilustrasi Metode Yasumura dan Kawai (Muñoz et al. 2008)

Kekuatan lentur dan keawetan kayu Jabon

Dalam penelitian ini digunakan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Kayu Jabon banyak ditemui di berbagai pulau di Indonesia. Berdasarkan Atlas Kayu Indonesia (Martawijaya et al. 2005), kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas kuat III-IV dengan rentang berat jenis berkisar antara 290-560 kg/m³. Pada kondisi kering, kekuatan lentur (F_b) kayu Jabon pada kondisi batas proporsional

adalah 37,96 MPa dan pada kondisi batas ultimit (*Modulus of Rupture* atau MoR) adalah 67,79 MPa. Modulus elastisitas (E atau MoE) kayu Jabon adalah 6670,80 MPa.

Dalam kaitannya dengan keawetan kayu sebagai komponen penyusun bangunan gedung, terutama terhadap serangan rayap kayu, kayu Jabon termasuk dalam kategori kelas II, sedangkan daya tahan terhadap serangan jamur pelapuk kayu termasuk dalam kategori kelas IV-V. secara umum kayu Jabon termasuk dalam kategori keterawetan kelas sedang.

Modulus Elastisitas Dinamik

Metode pengujian tidak merusak (non-destruktif) khususnya untuk pengujian material kayu merupakan salah satu metode untuk mendapatkan data empiris parameter Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) yang dihitung berdasarkan hubungan dengan berat jenis kayu (ρ , satuan kg/m³) dan kecepatan gelombang (v , satuan m/detik), yaitu menggunakan Persamaan 6 (CBS-CBT 2011).

$$E_{dyn} = \rho V^2 10^{-6} \dots\dots\dots (6)$$

Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamik (E_{dyn}) dan Modulus Elastisitas (E) telah dipelajari sebelumnya antara lain oleh Raymond et al. (2007), Benoit dan Sandoz (2011), Nowak, Hamrol-Bielecka, dan Jasieńko (2015), dan Poggi (2017). Raymond et al. (2007) dalam penelitiannya menyampaikan hubungan antara Modulus Elastisitas dengan Modulus Elastisitas Dinamik yang dinyatakan dalam Persamaan 7 sebagai berikut,

$$E = 0,899 E_{dyn} \quad ; \quad R^2 = 0,93 \quad \dots\dots\dots (7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian balok kayu laminasi lem dengan bahan material kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Lamina kayu mempunyai ukuran penampang 60 mm x 40 mm, sistem laminasi yang digunakan adalah horisontal dengan jumlah lamina sebanyak 4 (empat) lamina, sehingga terbentuk balok dengan ukuran penampang 60 mm x 160 mm. Sistem laminasi menggunakan lem *super adhesive* jenis *Strong Epoxy*. Perilaku lentur yang ditinjau adalah rigiditas lentur, kekuatan lentur, dan rasio daktilitas balok. Proses pembuatan benda uji meliputi pemilahan kayu, pembuatan lamina kayu, dan pembuatan balok laminasi dengan lem.

Gambar 7 memperlihatkan proses pengukuran kadar air untuk mengetahui kadar air pada masing-masing lamina kayu. Seluruh benda uji disusun pada kondisi

kadar air berkisar 7,0 % s.d. 11,5 %. Hasil ini memperlihatkan bahwa kayu dalam kondisi kering mengacu pada peraturan kayu Indonesia SNI 7973:2013 (BSN 2013).



Gambar 7 Proses Pengukuran Kadar Air Pada Lamina Kayu.

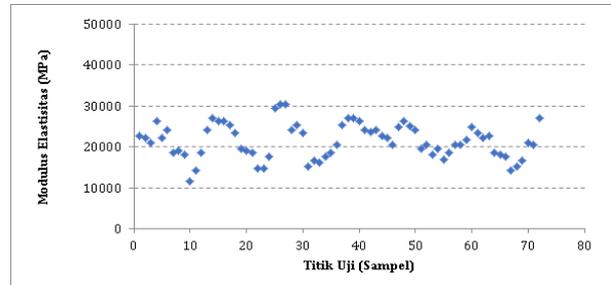
Gambar 8 memperlihatkan proses pemilahan kayu, yaitu pengujian sifat mekanika kayu Modulus Elastisitas masing-masing lamina kayu. Metode yang digunakan adalah uji non-destruktif (uji tidak merusak) dengan metode *direct measurement* dengan menggunakan alat uji Sylvatest TRIO (CBS-CBT 2011). Metode *direct measurement* merupakan salah satu metode pengukuran tidak merusak pada material kayu yang diperkenalkan oleh Benoit dan Sandoz (2011; CBS-CBT 2011) dengan alat ukur Sylvatest DUO yang dalam perkembangannya ditingkatkan kemampuannya dan mengalami perubahan nama alat ukur Sylvatest TRIO. Metode uji tidak merusak pada kayu Indonesia telah dilakukan sebelumnya oleh Pranata dan Tobing (2016) yaitu penelitian sifat mekanika kayu Rumah Tradisional Minangkabau, serta oleh Pranata dan Rusli (2019) yaitu penelitian sifat mekanika Rumah Tradisional Minahasa.

Dalam penelitian ini benda uji berjumlah 3 balok dan masing-masing balok terdiri dari 4 lamina kayu, sehingga jumlah kayu yang digunakan adalah 12 batang. Seluruh batang selanjutnya diuji dengan menggunakan pengujian non-destruktif, dengan masing-masing batang diuji pada 6 titik sampel. Total titik uji adalah 72 titik sampel.



Gambar 8 Proses Pengujian Non-Destruktif untuk Mendapatkan Sifat Mekanika Modulus Elastisitas Dinamik.

Hasil pengujian non-destruktif selengkapnya ditampilkan pada Gambar 9. Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamik dilakukan dengan menggunakan Persamaan 6 dengan berat jenis kayu Jabon yaitu 425 kg/m³. Selanjutnya perhitungan Modulus Elastisitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan 7.



Gambar 9 Hasil pengujian Non-Destruktif: Modulus Elastisitas (E) dengan Satuan MPa.

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa Modulus Elastisitas rata-rata lamina kayu adalah 21433,93 MPa dengan Deviasi Standar sebesar 4145,33 MPa dan Koefisien Variasi sebesar 19,34%. Nilai Koefisien Variasi yang diperoleh adalah kurang dari 25% (SNI 7973 : 2013) sehingga secara umum seluruh batang kayu dapat digunakan sebagai lamina kayu. Data empiris modulus elastisitas yang diperoleh selanjutnya menjadi acuan bagi penyusunan lamina-lamina kayu pada balok laminasi.

Gambar 10 memperlihatkan proses pengujian salah satu benda uji balok kayu laminasi.



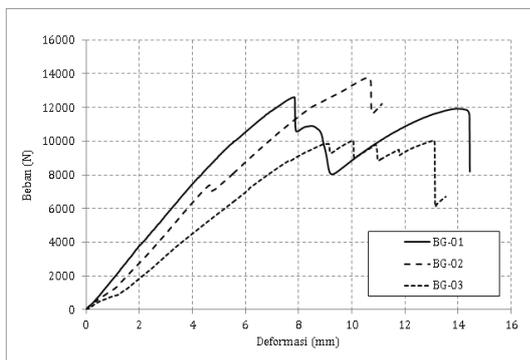
Gambar 10 Proses Pengujian Balok Laminasi Benda Uji.

Metode pengujian adalah *four-point loading test* dengan jarak a sebesar 500 mm (1/3 bentang balok). Selanjutnya Gambar 11 memperlihatkan ragam kegagalan balok yang terjadi pada benda uji yaitu *simple tension*, hal ini sesuai dengan salah satu model kegagalan benda uji lentur berdasarkan ASTM D143 (ASTM 2014), sehingga kegagalan yang diharapkan terjadi sesuai dengan hasil pengujian.



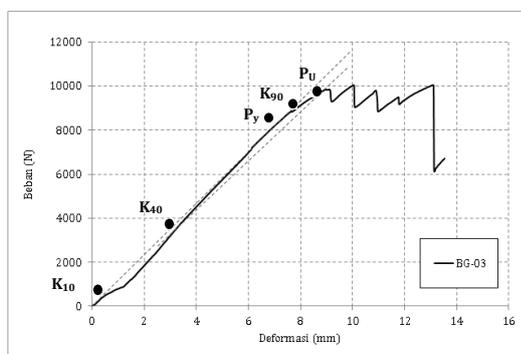
Gambar 11 Ragam Kegagalan Balok yang Terjadi untuk Seluruh Benda Uji yaitu *Simple Tension*.

Gambar 12 memperlihatkan kurva diagram hubungan beban versus deformasi balok. Hasil pengujian seluruh benda uji memperlihatkan trend kurva yang hampir sama, deformasi maksimum berkisar antara 7,65 mm s.d. 10,54 mm, beban maksimum berkisar antara 9,98 kN s.d. 13,74 kN.



Gambar 12 Kurva Diagram Hubungan Beban Versus Deformasi Balok.

Gambar 13 memperlihatkan contoh perhitungan titik batas proporsional (beban batas proporsional) dan titik batas ultimit (beban batas ultimit). Perhitungan titik batas proporsional (P_y) menggunakan literatur Muñoz et al. (2008) dengan menggunakan Metode Yasumura dan Kawai.



Gambar 13 Perhitungan Titik Batas Proporsional (Beban Batas Proporsional) dan Titik Batas Ultimit (Beban Batas Ultimit) pada Benda Uji BG-03.

Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1. Hasil Tabel 1 memperlihatkan bahwa rasio

daktilitas peralihan balok rata-rata adalah sebesar 1,28. Beban batas proporsional rata-rata adalah sebesar 10,43 kN, beban batas ultimit rata-rata adalah sebesar 12,07 kN.

Tabel 1 Hasil Perhitungan Titik Batas (Beban Batas) Proporsional dan Ultimit, dan Rasio Daktilitas Balok.

Benda Uji	P_y (kN)	d_y (mm)	P_u (kN)	D_u (mm)	μ
BG-01	10,51	5,97	12,49	7,65	1,28
BG-02	12,14	8,62	13,74	10,54	1,22
BG-03	8,66	7,44	9,98	9,93	1,33
rerata	10,43	7,34	12,07	9,37	1,28

Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2 Persamaan 3, dan Persamaan 4 dilakukan perhitungan rasio rigiditas lentur balok laminasi. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Rasio Rigiditas Lentur Balok Laminasi.

Benda Uji	M_y (kN.mm)	f_{b-lam} (MPa)	f_b (MPa)	k_s
BG-01	5250,71	20,51	37,96	0,54
BG-02	6067,72	23,70	37,96	0,62
BG-03	4329,69	16,91	37,96	0,45
rerata	5216,04	20,38	37,96	0,54

Perhitungan modulus penampang elastik dan tegangan lentur dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Hasil Tabel 2 memperlihatkan bahwa kekuatan lentur balok kayu laminasi-lem rata-rata adalah 20,38 MPa, sedangkan kekuatan lentur balok utuh sesuai referensi Atlas Kayu Indonesia adalah sebesar 37,96 MPa. Maka diperoleh rasio modulus penampang elastik balok rata-rata adalah sebesar 0,54.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian adalah kekuatan lentur balok kayu laminasi lem lebih rendah dibandingkan balok kayu utuh, dalam penelitian ini diperoleh rasio modulus penampang elastik sebesar 0,54, rasio daktilitas balok kayu laminasi diperoleh sebesar 1,28.

Hasil pengujian mengindikasikan bahwa kegagalan balok kayu laminasi lem adalah berupa kegagalan lentur mengacu pada kriteria kegagalan lentur sesuai ASTM D143.

Parameter modulus penampang elastik (S) balok kayu laminasi berguna untuk desain komponen struktur balok pada bangunan khususnya pada perhitungan kekuatan balok dan kekakuan balok sebagai persyaratan *serviceability*. Dalam peraturan kayu Indonesia, parameter tersebut digunakan untuk perhitungan kekuatan lentur terkoreksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan pada Universitas Kristen Maranatha melalui Hibah Penelitian Internal sehingga penulis dapat mengadakan pengujian, dan melakukan kegiatan penelitian tanpa kendala. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fernando Salim, Christianto, Eki Romario, Diego Jundo Banjar Nahor, Muhammad Maruf, dan Stefanny Abigail sehingga proses pembuatan benda uji dan pengujian dapat berjalan dengan lancar di Laboratorium Struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction. 2016. "Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16." USA.
- American Society for Testing and Materials. 2014. "ASTM D143-14 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International." West Conshohocken, PA.
- . 2015. "ASTM D198-15 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, ASTM International." West Conshohocken, PA.
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. "Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu SNI 7973:2013." BSN.
- Benoit, Y, dan J L Sandoz. 2011. "New Wooden Poles Grading Using Non-Destructive Technology." In *21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt*, 6-9.
- Bohnhoff, David R., Steven M. Cramer, Russell C. Moody, dan Calvin O. Cramer. 1989. "Modeling vertically mechanically laminated lumber." *Journal of Structural Engineering (United States)* 115 (10): 2661-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:10\(2661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:10(2661)).
- CBS-CBT. 2011. "Sylvatest TRIO User Manual." CBS-CBT.
- Chauf, Kusnindar Abdul, dan Sri Murni Dewi. 2016. "Structural Efficiency and Flexure Strength of Mix-Glulam Timber Beams are Composed of Sengon and Coconut Wood as Green Material Constructions." In *The 2nd International Multidisciplinary Conference*. Vol. 1. Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta. November 15th, 2016.
- Ezeagu, C A, A F Eromosele, H Okoro, U J Chukwujkwu, dan T B Emetomo. 2015. "Flexural Strength of solid and glue-laminated timber beams." *American Journal of Engineering Science and Technology Research* 3 (1): 1-14.
- Gliniorz, Kai Uwe, Khalid M. Mosalam, dan Julius Natterer. 2002. "Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks." *Composites Part B:Engineering* 33 (5): 367-81. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00020-3).
- Goodno, Barry J., dan James M. Gere. 2018. *Mechanics of Materials*. Eight. Boston: Cengage Learning.
- Kamiya, Fumio. 1985. "The Nonlinear Bending Behavior of Nailed Layered Components: Part I. Nailed Layered Beams." *Wood and Fiber Science* 17 (1): 117-31.
- Martawijaya, A, I Kartasujana, K Kadir, dan S P Among. 2005. "Atlas Kayu Indonesia Jilid I Cetakan ke Tiga (edisi revisi)." *Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan*. Bogor: Departemen Kehutanan.
- Massaro, Francesco Mirko, dan Kjell Arne Malo. 2019. "Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain." *European Journal of Wood and Wood Products* 77 (5): 821-32. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01437-4>.
- Muhammed, C K Umaima, dan R Arya. 2015. "Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4 (4): 2485-93. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2015.0404051>.
- Muñoz, Williams, Alexander Salenikovich, Mohammad Mohammad, dan Pierre Quenneville. 2008. "Determination of yield point and ductility of timber assemblies: In search for a harmonised approach." In *10th World Conference on Timber Engineering 2008*, 2:1064-71.
- Nowak, T, K Hamrol-Bielecka, dan J Jasieńko. 2015. "Experimental testing of glued laminated timber members using ultrasonic and stress wave techniques." In *Proc. of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures-SHATIS*, 15:523-33.
- Poggi, Francesco. 2017. "Bending Properties of Commercial Wood-based Panels by NDT Methods." Master Thesis in Forestry and Wood Technology: Linnaeus University.

- Pranata, Yosafat Aji, dan Heri Lumban Tobing. 2016. "Non-destructive Testing to Obtain the Dynamic Elastic Modulus of the Existing Minangkabau Wooden House." In *International Conference on Technology, Innovation, Society (ICTIS)*, 389–93. <https://doi.org/10.21063/ictis.2016.1060>.
- Pranata, Yosafat Aji, dan Muhammad Rusli. 2019. "Non-Destructive Testing of The Existing Timber Columns of Minahasa Traditional House." In *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10:313–22. IAEME Publication.
- Pranata, Yosafat Aji, dan Bambang Suryoatmono. 2019. *Systruktur Kayu: Analisis dan Desain dengan LRFD*. Bandung: Remaja Rosdakarya.
- Pranata, Yosafat Aji, Bambang Suryoatmono, dan Johannes Adhijoso Tjondro. 2011. "The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam." In *EACEF-International Conference of Civil Engineering*, 1:33. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- . 2012. "Rasio Modulus Penampang Elastik Balok Kayu Laminasi-Baut." *Jurnal Teknik Sipil* 19 (3): 223. <https://doi.org/10.5614/jts.2012.19.3.4>.
- Raymond, Carolyn A., B. Joe, R. Evans, dan R. L. Dickson. 2007. "Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and SilviScan properties for Pinus radiata in New South Wales." *New Zealand Journal of Forestry Science* 37 (2): 186–96.