

Faktor Stabilitas Balok Kayu pada Konfigurasi Pembebanan Terpusat

Agustina Hayatunnufus¹, Naresworo Nugroho^{1*} dan Effendi Tri Bahtiar¹

¹ Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor. Jl. Lingkar Akademik, Kampus IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat Indonesia 16680

* Penulis korespondensi: nares@apps.ipb.ac.id

Abstract: *The use of wood as a building material must be designed quite rigid and strong. According to SNI 7973:2013, the corrected design value on the wooden structure components must be in accordance with the condition of wood to be used. The objective of this study is to determine the value of timber beams stability (C_L) both of softwood and hardwood based on SNI 7973:2013 for construction purposes. The material in this research to be used are pine (*Pinus merkusii*), agathis (*Agathis dammara*), mahogany (*Swietenia macrophylla*), and red meranti (*Shorea leprosula*). Testing of physical properties include moisture content, specific gravity, and density, meanwhile testing of mechanical properties include flexural strength, modulus of elasticity, and ductility. Mechanical testing is carried out on a small clear specimens and full-size specimens, while the physical properties are tested only on a small clear specimens. The full-size specimens are visually sorted and the strength ratio (S) is determined prior to mechanical testing. The result of this study showed that the highest strength ratio was in meranti 55.85%, agathis 52.98%, pine 46.76%, and mahogany 46.60%. Softwood has a lower S value to more knot defects than hardwood. The slenderness ratios of agathis, pine, mahogany, and meranti wood respectively are 7.48, 7.45, 7.40 and 7.66 so that all specimens are referred to as short beams. The value of beam stability (C_L) is close to 1 that indicates that the beams are stable and does not twist.*

Keywords: *beam; mechanical properties; stability factor; wood construction*

1. Pendahuluan

Kayu merupakan sumber daya alam yang penting untuk berbagai keperluan, terutama untuk konstruksi bangunan yaitu berupa rangka atap, lantai, pintu, jendela, lemari, dan furnitur kayu lainnya [1,2,3,4]. Kayu juga memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang bernilai tinggi sehingga banyak digunakan untuk struktur bangunan [5]. Kayu sebagai alternatif bahan konstruksi bangunan dan menganalisa bahwa konstruksi dari kayu olahan diposisikan sebagai prioritas utama dari berbagai macam tipe konstruksi [6]. Konsumen cenderung lebih menyukai kayu untuk berbagai aplikasi konstruksi dibandingkan bahan bangunan lainnya, meskipun para responden tersebut tinggal di area yang jarang menggunakan kayu [7].

Jenis kayu yang dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi bangunan dan biasa digunakan di Indonesia beberapa diantaranya yaitu kayu pinus (*Pinus merkusii* Jungh et de Vriese), agathis (*Agathis dammara* (Lambert) Rich), mahoni (*Swietenia macrophylla* King), dan meranti merah (*Shorea leprosula* Miq.). Kayu pinus dan agathis termasuk jenis kayu daun jarum (*softwood*) dan biasanya digunakan untuk keperluan konstruksi ringan seperti lantai, cetakan,

Diterima: 27 September 2021

Disetujui: 28 Juli 2022

Sitasi:

Hayatunnufus, A.; Nugroho, N.; Bahtiar, E.T. Faktor Stabilitas Balok Kayu pada Konfigurasi Pembebanan Terpusat. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7

(2): 129-146.,

<https://doi.org/10.29244/jsil.7.2.129-146>

lemari, panel, dan tiang [8,9]. Kayu mahoni dan meranti merah termasuk jenis kayu daun lebar (*hardwood*) dan dapat dijadikan sebagai bahan baku mebel serta konstruksi berat karena kekuatannya yang tinggi [10]. Perencanaan struktur bertujuan untuk menghasilkan struktur yang stabil, kuat, dan awet serta memenuhi kemudahan dalam pelaksanaannya [11].

Perencanaan dapat dilakukan berdasarkan peraturan kayu yang ada, sebagai contoh di Indonesia terdapat Standar Nasional Indonesia (SNI) 7973: 2013 [12] dan di Amerika Serikat terdapat *National Design Specification* (NDS) 2012 [13]. Standarisasi desain dan pengujian penting dilakukan tidak hanya untuk pengembangan penggunaan dan penerapan teknologi, tetapi untuk keamanan populasi pengguna teknologi [14]. Salah satu faktor koreksi untuk nilai desain acuan komponen struktur kayu yaitu faktor stabilitas balok. Faktor koreksi stabilitas balok mengacu pada kemampuan balok untuk tidak terguling, tergeser, atau terputar [15]. Berkenaan dengan hal ini, penelitian ini menganalisis respon yang terjadi pada balok kayu setelah diberi pembebanan lentur guna mendapatkan nilai stabilitas balok.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan adalah jenis kayu daun jarum yaitu kayu pinus (*Pinus merkusii* Jungh et de Vriese) dan agathis (*Agathis dammara* (Lambert) Rich), dan jenis kayu daun lebar yaitu kayu mahoni (*Swietenia macrophylla* King) dan meranti merah (*Shorea leprosula* Miq) dalam bentuk balok berukuran (6×12×400) cm³ yang diperoleh dari toko bangunan di Bogor.

Peralatan yang digunakan adalah *circular saw*, *planner* untuk meratakan dan menghalus permukaan kayu, timbangan elektrik, gergaji, mistar, kaliper untuk mengukur dimensi contoh uji, oven untuk pengujian sifat fisis contoh uji, *Universal Testing Machine* (UTM) Instron type 3369, dan UTM Baldwin kapasitas 30 ton yang dilengkapi dengan *Linier Variable Displacement Transducer* (LVDT) dan *Multipurpose Digital Indicator* (MPDI).

2.2. Prosedur Kerja

2.2.1. Persiapan Bahan

Persiapan bahan terdiri dari persiapan bahan untuk contoh uji kecil bebas cacat dan contoh uji berukuran penuh. Balok kayu pinus, agathis, meranti dan mahoni untuk contoh kecil bebas cacat dipotong dengan masing-masing penampang berukuran (2.5×2.5×41) cm³. Sementara, untuk contoh uji berukuran penuh dipotong dengan dimensi batang kayu masing-masing penampang berukuran (4×10×90) cm³. Kayu diampelas menggunakan ampelas ukuran 240 grit.

2.2.2. Pengujian Lentur Contoh Kecil Bebas Cacat

Pengujian lentur contoh kecil bebas cacat yang dilakukan yaitu pengujian *Modulus of Elasticity* (E) dan Kekuatan Lentur (S_R). Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan UTM Instron type 3369 sebanyak 50 ulangan pada setiap jenis kayu. Sampel untuk pengujian E dan S_R ukurannya sebesar (2.5 × 2.5 × 76)cm³ yang ditentukan berdasarkan standar ASTM D-143 [16]. Persamaan untuk mendapatkan nilai E dan S_R pada masing-masing pembebanan dihitung sesuai persamaan 1 dan 2.

$$E = \frac{\Delta PL^3}{4\Delta Ybh^3} \quad (1)$$

$$S_R = \frac{3P_{maks}L}{2bh^2} \quad (2)$$

Keterangan:

- E : Modulus elastisitas untuk satu pembebanan terpusat (MPa)
 S_R : Modulus patah untuk satu pembebanan terpusat (MPa)
 P_{max} : Beban maksimum (kg)
 ΔP : Peningkatan beban di bawah batas proporsional (kg)
 L : Jarak sangga (cm)
 ΔY : Peningkatan defleksi sumbu netral balok yang diukur di tengah bentang jarak L dan beban P (cm)
 b : Lebar contoh uji (cm)
 h : Tebal contoh uji (cm)

Rasio daktilitas (μ) didefinisikan sebagai rasio deformasi pada beban maksimum (Δu) terhadap deformasi pada titik luluh semu (Δy). Nilai μ dihitung berdasarkan Persamaan 3.

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3)$$

Keterangan:

- μ : Rasio daktilitas
 Δu : Deformasi pada beban maksimum (cm)
 Δy : Deformasi pada titik luluh semu (cm)

2.2.3. Pengujian Sifat Fisis

Pengujian sifat fisis meliputi kadar air (KA), berat jenis (BJ), dan kerapatan (ρ). Contoh uji sifat fisis KA, BJ, dan kerapatan dilakukan sebanyak 50 ulangan. Contoh uji untuk pengujian kerapatan dan berat jenis kayu berukuran $(2.5 \times 2.5 \times 41) \text{ cm}^3$. Pengujian ini dilakukan sebelum pengujian mekanis dengan mengukur volume dan menimbang berat sesuai dengan kondisi kering udara. Sementara, contoh uji KA diperoleh dari hasil pemotongan contoh uji mekanis dengan ukuran $(2.5 \times 2.5 \times 2.5) \text{ cm}^3$ ditimbang berat awalnya, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu $(103 \pm 2)^\circ \text{C}$ selama 2×24 jam, kemudian didinginkan selama kurang lebih 15 menit di dalam desikator. Contoh uji ditimbang berat kering oven dan diukur kembali dimensinya. Nilai kerapatan, kadar air dan berat jenis kayu dapat dilihat pada persamaan 4, 5 dan 6.

$$\rho = \frac{B_0}{V_0} \quad (4)$$

$$KA = \frac{B_1 - B_2}{B_2} \times 100\% \quad (5)$$

$$BJ = \frac{\rho}{(1 + KA) \times \rho_{air}} \quad (6)$$

Keterangan:

- ρ : Kerapatan ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
 B_0 : Berat awal sebelum pengujian (g)
 V_0 : Volume awal sebelum pengujian (cm^3)

KA	: Kadar air (%)
B_1	: Berat awal setelah pengujian (g)
B_2	: Berat kering oven setelah pengujian (g)
BJ	: Berat jenis
ρ_{air}	: 1 g.cm^{-3}

2.2.4. Pengujian Sifat Fisis

Penentuan SR dilakukan berdasarkan standar *American Society for Testing and Materials (ASTM) D-245* [17]. Penentuan S ditentukan dengan mengukur mata kayu dan miring serat. Miring serat diukur per inci (2.5cm) sampai ke tepi kayu untuk mendapatkan nilai tabel *strength ratio*. Miring serat dapat dikelompokkan menjadi beberapa ukuran per inci-nya seperti pada Tabel 1, 2, 3, dan 4.

Tabel 1. Nilai rasio kekuatan (*strength ratio*) berdasarkan miring serat.

Miring Serat	Maksimum Strength Ratio (%)	
	Tarik Sejajar Serat /Lentur	Tekan Sejajar Serat
1 in 6	40	56
1 in 8	53	66
1 in 10	61	74
1 in 12	69	82
1 in 14	74	87
1 in 15	76	100
1 in 16	80	---
1 in 18	85	---
1 in 20	100	---

Sumber: ASTM D245

Tabel 2. Nilai S berdasarkan mata kayu (*wide face knot*).

Ukuran mata kayu (mm)	Persentase Nilai S pada Ukuran Lebar Contoh Uji (%)						
	76	89	102	114	127	140	152
6	94	95	95	96	96	96	97
13	86	88	90	91	91	92	93
19	79	82	84	85	87	88	89
25	72	75	78	80	82	84	85
32	64	69	72	75	78	79	81
38	57	62	67	70	73	75	78
44	49	56	61	65	68	71	74
51	35	49	55	60	64	67	70
57	26	37	50	55	59	62	66
64	18	30	39	50	54	58	62
70	---	23	32	40	50	54	58
76	---	---	26	34	41	50	54
83	---	---	---	29	36	45	51
89	---	---	---	23	31	37	47
95	---	---	---	---	26	32	38
102	---	---	---	---	21	28	34
108	---	---	---	---	---	23	30
114	---	---	---	---	---	19	26
121	---	---	---	---	---	---	21
127	---	---	---	---	---	---	17
133	---	---	---	---	---	---	---

Sumber: ASTM D245

Tabel 3. Nilai S berdasarkan mata kayu (*edge knot*).

Ukuran mata kayu (mm)	Persentase Nilai S pada Ukuran Lebar Contoh Uji (mm)									
	51	64	76	89	102	114	127	140	152	178
6	83	86	88	89	91	91	92	93	94	94
13	65	71	75	78	80	82	84	85	86	88
19	49	57	62	67	70	73	75	77	79	82
25	27	38	51	57	61	65	68	70	73	76
32	16	27	36	47	52	57	60	63	66	71
38	---	17	26	34	40	49	53	57	60	64
44	---	---	19	26	33	38	47	50	54	60
51	---	---	---	19	26	32	37	45	49	55
57	---	---	---	---	20	26	31	36	40	50
64	---	---	---	---	15	21	26	31	35	45
70	---	---	---	---	---	16	21	26	30	38
76	---	---	---	---	---	---	17	21	26	33
83	---	---	---	---	---	---	---	17	22	29
89	---	---	---	---	---	---	---	---	18	26
95	---	---	---	---	---	---	---	---	---	23
102	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Sumber: ASTM D245

Tabel 4. Nilai S berdasarkan mata kayu (*narrow face*).

Ukuran mata kayu (mm)	Persentase Nilai S pada Ukuran Lebar Contoh Uji (mm)									
	25	38	51	64	76	89	102	114	127	140
6	85	89	91	93	94	95	95	96	96	96
13	67	76	81	84	86	88	90	91	91	92
19	48	62	70	75	79	82	84	85	87	88
25	4	49	60	68	72	75	78	80	82	84
32	---	---	49	58	64	69	72	75	78	79
38	---	---	27	49	57	62	67	70	73	75
44	---	---	15	32	49	56	61	65	68	71
51	---	---	---	22	35	49	55	60	64	67
57	---	---	---	---	26	37	50	55	59	62
64	---	---	---	---	18	30	39	50	54	58
70	---	---	---	---	---	23	32	40	50	54
76	---	---	---	---	---	---	26	30	41	50
83	---	---	---	---	---	---	---	---	36	45
89	---	---	---	---	---	---	---	---	---	37

Sumber: ASTM D245

Pengukuran mata kayu ditentukan dengan mengukur mata kayu pada permukaan lebar dan tebal yang dicantumkan sesuai pada tabel 2,3 dan 4. Apabila ditemukan cacat kayu berupa retak, pecah, dan/atau belah pada permukaan contoh uji maka nilai dari rasio kekuatannya menjadi 50%. Contoh uji untuk penentuan SR dilakukan sebanyak tiga ulangan. Nilai rasio kekuatan total ditunjukkan pada persamaan 7.

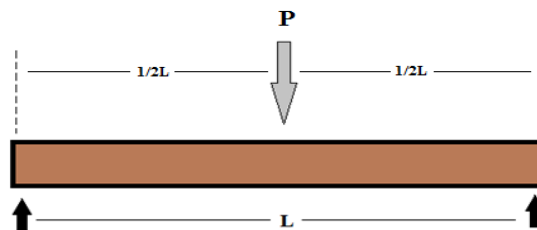
$$S = S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (7)$$

Keterangan:

- S : *Strength Ratio Total* (%)
 S_1 : Nilai S berdasarkan miring serat (%)
 S_2 : Nilai S berdasarkan mata kayu (%)
 S_3 : Nilai S berdasarkan retak, pecah, dan/atau belah (%)

2.2.5. Pengujian Lentur Contoh Uji Berukuran Penuh

Pengujian lentur pada contoh uji berukuran penuh mengacu ASTM D-198 [18]. Pengujian yang dilakukan pada balok bentang tunggal dengan satu beban terpusat. Konfigurasi pembebanan terpusat terdapat pada SNI 7973: 2013 [12]. Pengujian ini diuji menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) merek Baldwin.



Gambar 1. Konfigurasi pembebanan terpusat.

2.2.6. Pengujian Lentur Contoh Uji Berukuran Penuh

Faktor stabilitas balok yang ditentukan pada penelitian ini yaitu faktor stabilitas balok acuan dan faktor stabilitas balok aktual. C_L acuan maupun aktual ditentukan berdasarkan panjang bentang efektif dan rasio kelangsingan untuk komponen balok lentur. Faktor stabilitas balok mengacu pada SNI 7973: 2013 [12]. Panjang efektif untuk komponen balok lentur pada konfigurasi pembebanan terpusat dengan tumpuan lateral diantara beban dapat dilihat pada persamaan 8.

$$l_e = 2.061l_u \quad (8)$$

Keterangan:

- l_e : Panjang bentang efektif untuk komponen balok lentur (cm)
 l_u : Jarak antara titik-titik tumpu ujung (cm)

Nilai stabilitas balok untuk komponen balok lentur dihitung berdasarkan persamaan 9 dan 10.

$$C_{L_{acuan}} = \frac{1 + \left(\frac{F_{bE}}{F'_b}\right)}{1.9} - \sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{F_{bE}}{F'_b}\right)}{1.9}\right]^2 - \frac{\left(\frac{F_{bE}}{F'_b}\right)}{0.95}} \quad (9)$$

$$C_{L_{aktual}} = \frac{1 + \left(\frac{F_{bE_{aktual}}}{F'_{b_{aktual}}}\right)}{1.9} - \sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{F_{bE_{aktual}}}{F'_{b_{aktual}}}\right)}{1.9}\right]^2 - \frac{\left(\frac{F_{bE_{aktual}}}{F'_{b_{aktual}}}\right)}{0.95}} \quad (10)$$

Keterangan:

F'_b : Nilai desain lentur acuan dikalikan dengan semua faktor koreksi kecuali C_{fu} (faktor penggunaan rebah), C_V (faktor volume untuk glulam struktural atau kayu komposit untuk struktural), dan C_L (faktor stabilitas balok) (kg)

$F'_{b_{aktual}}$: Nilai kekuatan lentur aktual dikalikan dengan semua faktor koreksi kecuali C_{fu} (faktor penggunaan rebah), C_V (faktor volume untuk glulam struktural atau kayu komposit untuk struktural), dan C_L (faktor stabilitas balok) (kg)

F_{bE} : Nilai desain tekuk kritis untuk komponen struktur lentur ($F_{bE} = \frac{1.20E_{min'}}{R_B^2}$) (MPa)

$F'_{bE_{aktual}}$: Nilai desain tekuk kritis untuk komponen struktur lentur ($F'_{bE_{aktual}} = \left(\frac{1.20E_{aktual}}{R_B^2}\right)$) (MPa)

E_{min} : Modulus elastisitas acuan terkoreksi untuk perhitungan stabilitas balok dan kolom (MPa)

E_{aktual} : Modulus elastisitas aktual (MPa)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan analisis regresi linier sederhana untuk melihat pengaruh berat jenis (BJ) kayu terhadap modulus elastisitas (E), kekuatan lentur (S_R), dan rasio daktilitas (μ). Model yang digunakan untuk rancangan ini dapat dilihat pada persamaan 11.

$$y = a \times bx \quad (11)$$

Keterangan:

y : Estimasi untuk sifat mekanis kayu (E , S_R , dan μ),

a, b : Konstanta untuk masing-masing jenis kayu,

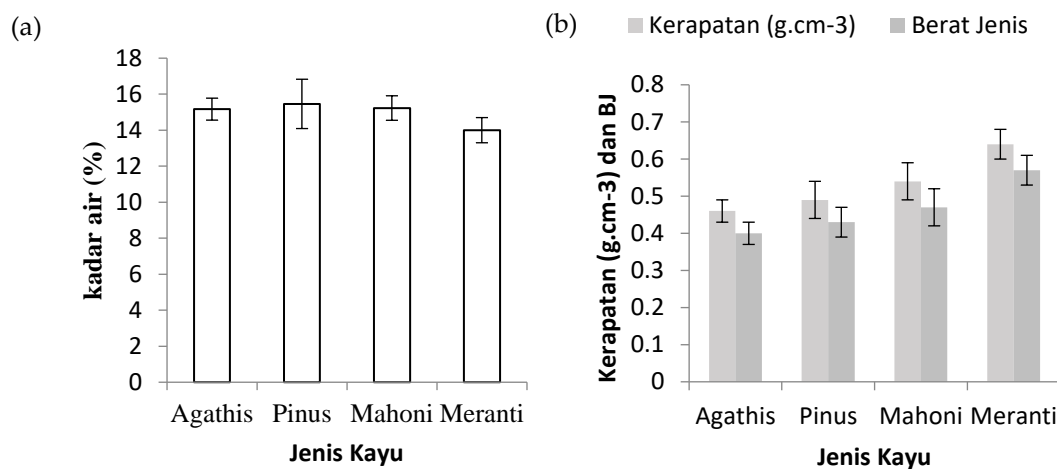
x : Berat jenis kayu

3.2. Sifat Fisis Kayu

Kadar air didefinisikan sebagai banyaknya air atau massa air yang terdapat di dalam kayu, yang dinyatakan persen terhadap berat kering tanur [19,20]. Gambar 2a menunjukkan nilai rata-rata kadar air kayu agathis, pinus, meranti, dan mahoni berturut-turut adalah sebesar 15.17%, 15.46%, 15.23% dan 14.00%. Rata-rata kadar air keempat jenis kayu pada saat pengujian telah mencapai kadar air di bawah titik jenuh serat (30%) dan sudah mencapai kering udara sekitar 10%-18% [21]. Kekuatan kayu akan meningkat seiring dengan penurunan kadar air di bawah titik jenuh serat [22]. Kayu yang berada di bawah

titik jenuh serat akan mengalami pemadatan dinding sel sehingga seratnya menjadi kuat [23]. Persyaratan kadar air untuk bahan baku produk maksimum 20%, sementara untuk mebel 8%-14% [24].

Kerapatan atau berat jenis merupakan indikator banyaknya zat kayu dan berkaitan erat dengan mutu kayu maupun pengolahannya [25]. Secara berurutan dari berat jenis rendah ke tinggi adalah agathis, pinus, mahoni dan meranti dengan kisaran 0.4, 0.43, 0.47, dan 0.57. Kerapatan pada kayu agathis, pinus, mahoni dan meranti berkisar 0.46 g.cm^{-3} , 0.49 g.cm^{-3} , 0.54 g.cm^{-3} , dan 0.64 g.cm^{-3} . Variasi nilai kerapatan kayu ditentukan oleh susunan jumlah zat kayu, rongga sel dan pori, kadar air serta zat ekstraktif yang terkandung dalam kayu [21]. Dinding serat yang tebal akan menghasilkan kerapatan kayu yang tinggi sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar, lebih keras, dan lebih kaku dibandingkan kayu dengan kerapatan rendah [26].



Gambar 2. Nilai kadar air kayu agathis, pinus, mahoni, dan meranti.

3.3. Strength Ratio (S) Contoh Uji Berukuran Penuh

Konsep *strength ratio* telah dipergunakan sejak lama sehingga banyak standar yang tetap menggunakan metode pemilahan visual untuk menentukan mutu kayu. Pemilahan visual bertujuan untuk mengkonversi cacat-cacat kayu menjadi rasio kekuatan (S) sehingga mengurangi kekuatan bahkan kayu tersebut tidak dapat digunakan sebagai bahan konstruksi [27,28]. Pemilahan visual didasarkan pada karakteristik yang dapat dinilai secara visual seperti jumlah mata kayu, kemiringan serat, keberadaan kayu reaksi, retak atau busuk [29, 5,30].

Tabel 5. Nilai rasio kekuatan pada pembebanan terpusat.

Jenis Kayu	Parameter	n	Min	Max	Mean	Stdev	CV
Agathis	<i>S slope of grain (%)</i>	3	50.40	71.10	57.39	11.88	20.70
	<i>S knots (%)</i>	3	88.00	95.71	92.90	4.26	4.59
	<i>S check, shake, split (%)</i>	3	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
	<i>S total (%)</i>	3	47.88	62.57	52.98	8.31	15.69
Pinus	<i>S slope of grain (%)</i>	3	56.20	67.40	61.16	5.71	9.33
	<i>S knots (%)</i>	3	70.33	86.71	76.92	8.65	11.24
	<i>S check, shake, split (%)</i>	3	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
	<i>S total (%)</i>	33	44.14	46.76	46.76	2.36	5.05
Mahoni	<i>S slope of grain (%)</i>	3	47.00	52.87	53.04	5.80	10.94
	<i>S knots (%)</i>	3	73.71	89.10	43.62	13.70	31.41
	<i>S check, shake, split (%)</i>	3	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
	<i>S total (%)</i>	3	43.20	49.59	46.60	3.22	6.90
Meranti	<i>S slope of grain (%)</i>	3	69.10	80.50	72.97	6.52	8.94
	<i>S knots (%)</i>	3	68.50	92.14	76.88	13.24	17.22
	<i>S check, shake, split (%)</i>	3	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
	<i>S total (%)</i>	3	47.33	63.86	55.85	8.27	14.81

Tabel 5 menunjukkan bahwa kayu meranti memiliki nilai S tertinggi yaitu berkisar antara 47.33-63.86%, kemudian kayu agathis antara 47.88-62.57%, kayu mahoni antara 43.20-49.59%, dan nilai S terendah dimiliki oleh kayu pinus antara 44.14-46.76%. Kayu daun jarum memiliki nilai S yang rendah karena cacat yang lebih banyak dibandingkan dengan jenis kayu daun lebar. Kayu mahoni dan meranti pada pengujian ini memiliki sedikit mata kayu yang berukuran kecil dan arah seratnya relatif lurus.

Sementara, kayu agathis dan pinus memiliki arah serat yang miring dan banyak ditemukan mata kayu sehingga nilai S -nya rendah.

Miring serat dan mata kayu sangat mempengaruhi nilai S [31]. Mata kayu merupakan sisa-sisa cabang yang kurang lebih tegak lurus terhadap sumbu longitudinal batang pohon [32,33]. Mata kayu sering digunakan sebagai pembatas kelas mutu kekuatan kayu, karena di sekitar mata kayu akan terjadi pembengkokan atau kemiringan serat sehingga kekuatan kayu akan berkurang [34,35,36]. Sortimen dengan mata kayu memiliki nilai E dan S_R yang lebih rendah dibandingkan sortimen tanpa mata kayu [37]. Pada penelitian ini, kayu yang didapatkan sudah dipotong dalam bentuk balok. Pemotongan kayu berpengaruh terhadap variasi miring serat. Pola penggergajian kayu dapat menghasilkan potongan kayu yang seratnya tidak sejajar dengan sumbu longitudinal sehingga setiap penyimpangan serat dapat mengurangi kekuatan kayu [31,38,33].

3.4. Lentur Contoh Kecil Bebas Cacat

Modulus elastisitas (E) adalah tegangan sampai batas maksimal yang dapat diterima oleh serat kayu tanpa mengalami perubahan bentuk yang tetap bila daya luar yang bekerja dihilangkan. Kekuatan lentur (S_R) merupakan kekuatan maksimum dari suatu material hingga mengalami kerusakan [39]. Rata-rata hasil pengujian sifat mekanis yang telah dilakukan ditunjukkan seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai estimasi parameter populasi E dan S_R .

Jenis Kayu	Agathis		Pinus		Meranti		Mahoni	
	E	S_R	E	S_R	E	S_R	E	S_R
Weibull								
5% Point Estimate	5979	40.62	3914	36.89	7234	45.12	5465	49.04
Lognormal								
5% Point Estimate	6392	45.14	4203	38.23	7967	51.88	5731	50.71
5% TL (75%)	6319	44.64	4033	37.16	7807	50.44	5518	49.43
Normal								
Mean	7407	52.03	7341	55.57	10372	75.33	8013	70.83
Standard Deviation	639	4.46	2069	10.76	1559	15.95	1449	12.52
5% Point Estimate	6336	44.55	3871	37.53	7756	48.59	5583	49.85
5% TL (75%)	6250	43.95	3592	36.08	7547	46.45	5388	48.17
Non Parametric								
5% Point Estimate	6829	53.58	7257	56.60	11306	93.48	3295	67.79
5% TL (75%)	7157	52.23	6516	58.87	12580	87.77	8742	68.36

Tabel 6 menunjukkan bahwa rata-rata nilai E contoh kecil bebas cacat agathis, pinus, meranti, dan mahoni berturut-turut adalah 7407.82 Mpa, 7341.40 MPa, 10372.25 MPa, dan 8013.79 MPa sedangkan

rata-rata nilai kekuatan lenturnya (S_R) berturut-turut adalah 52.03 MPa, 55.57 MPa, 75.33 MPa, dan 70.83 MPa. Agathis dikategorikan ke dalam kelas mutu E13-E15, pinus kelas mutu E8-E15, meranti kelas mutu E14-E25, dan mahoni kelas mutu E6-E18 berdasarkan SNI 2013. Pada pengujian lentur ini, sebaran data paling pas diduga menggunakan distribusi Weibull. Nilai kekuatan karakteristik lentur dari modulus elastisitas (E_{min}) dan kekuatan lentur (S_R) ditentukan dengan mengestimasi 5% *exclusion limit* dari suatu populasi. Karakteristik lentur yang diperoleh terdapat tiga distribusi parametrik yang digunakan antara lain distribusi normal, lognormal, dan Weibull. Pengujian E dan S_R digunakan sampel uji yang sama sehingga akan menghasilkan asumsi distribusi terbaik yang sama. Hasil penelitian menunjukkan E_{min} agathis, pinus, meranti, dan mahoni berturut-turut adalah 5979.69 MPa, 3914.88 MPa, 7234.31 MPa, dan 5465.57 MPa sedangkan nilai S_R adalah 40.62 MPa, 36.89 MPa, 45.12 MPa, dan 49.04 MPa. Distribusi Weibull mendominasi hasil penelitian sehingga dipilih sebagai distribusi yang paling pas dengan nilai eror yang sedikit terhadap nilai E dan S_R . Analisis Weibull diperlukan untuk meminimalisir nilai eror yang dihasilkan [40]. ASTM D5457 memilih distribusi Weibull sedangkan standar Eropa memilih distribusi lognormal untuk menentukan kekuatan karakteristik kayu [41].

Daktilitas merupakan kemampuan suatu bahan untuk mencapai deformasi yang tinggi dan berubah bentuk secara plastis tanpa mengalami kerusakan dan kehilangan terlalu banyak kekuatan [42,43,44]. Tabel 7 menunjukkan rata-rata rasio daktilitas (μ) pada kayu agathis, pinus, meranti dan mahoni berturut-turut adalah 3.51, 3.25, 3.19, dan 3.44. Rata-rata rasio daktilitas yang terendah diperoleh pada kayu mahoni. Balok yang memiliki daktilitas yang rendah menunjukkan kegagalan balok yang terjadi cenderung lebih getas [32]. Pada penelitian ini, kayu mahoni memiliki nilai μ yang lebih rendah, yang menunjukkan bahwa kayu mahoni lebih getas dibandingkan dengan ketiga jenis kayu lainnya.

Tabel 7. Rasio daktilitas kayu.

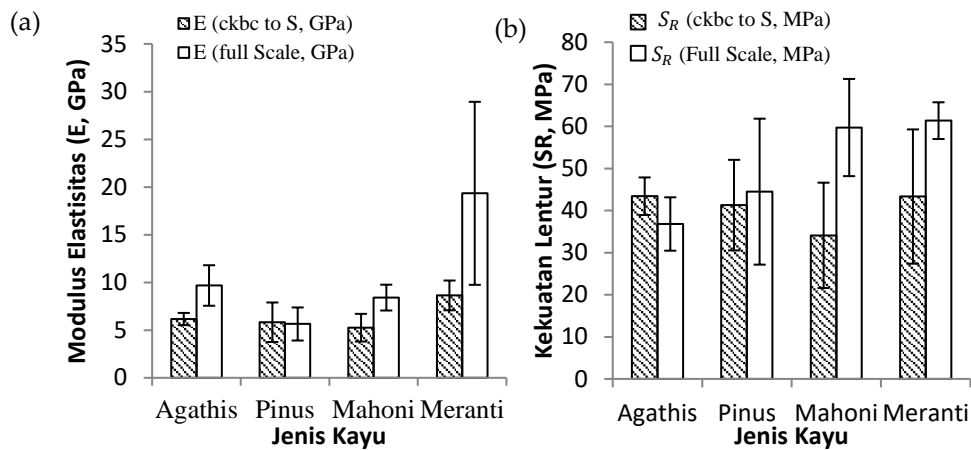
Jenis Kayu	n	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Standar	Koefisien
					Deviasi	Variasi (%)
Agathis	50	2.82	4.33	3.51	0.38	10.95
Pinus	50	1.95	4.98	3.25	0.54	16.68
Mahoni	50	2.01	4.16	3.19	0.52	16.21
Meranti	50	2.01	4.97	3.44	0.68	19.79

3.5. Lentur Contoh Uji Berukuran Penuh

Modulus elastisitas (E) adalah kemiringan proporsional garis linier dari kurva tegangan dan regangan. Nilai E kayu merupakan indikasi dari kekakuan (*stiffness*). Semakin besar nilai E maka suatu material semakin kaku, defleksi yang dialami lebih kecil dan tidak mudah mengalami tekuk. S_R merupakan tegangan lentur atau kekuatan serat yang terjadi pada beban maksimum yaitu pada saat benda mengalami kegagalan (*failure*) [45].

Hasil pengujian lentur contoh uji ukuran penuh pada konfigurasi pembebanan terpusat menunjukkan bahwa kayu meranti memiliki nilai E tertinggi yaitu 19.34 GPa, agathis sebesar 9.67 GPa, mahoni sebesar 8.40 GPa, dan pinus sebesar 5.64 GPa. Dikarenakan ukuran contoh ujinya besar, terdapat cacat-cacat kayu yang ditemukan pada spesimen kayu yang diuji sehingga nilai E dikalikan dengan rasio kekuatannya. Nilai E tersebut yang didapatkan pada kayu agathis, pinus, mahoni dan meranti masing-masing berkisar 6.16 GPa, 5.82 GPa, 5.25 GPa, dan 8.63 GPa. Adanya cacat-cacat kayu pada contoh uji berukuran penuh, menyebabkan kelas mutu masing-masing kayu menurun. Agathis dikategorikan ke

dalam kelas mutu E6, pinus kelas mutu E5, meranti kelas mutu E8, dan mahoni kelas mutu E5 berdasarkan SNI 2013. Beberapa faktor yang berpengaruh pada nilai E antara lain panjang bentang, ukuran dimensi bentang, posisi bentang (rebah atau tegak), sifat dasar bahan seperti kadar air dan ada atau tidaknya cacat pada kayu [46]. Nilai kekuatan lentur tertinggi pada pengujian ini yaitu pada kayu meranti sebesar 61.35 MPa, diikuti mahoni sebesar 59.72 MPa, pinus sebesar 44.49 GPa, dan agathis sebesar 36,80 MPa. nilai S_R contoh kecil bebas cacat pa kayu agathis, pinus dan mahoni masing-masing berkisar 43.40 MPa, 41.28 MPa, 34.10 MPa, dan 43.33 MPa. Semakin besar nilai E dan S_R menunjukkan suatu material lebih mampu mempertahankan keteguhannya tanpa resiko kegagalan mekanis [47].



Gambar 3. Nilai modulus elastisitas (E) dan kekuatan lentur (S_R) contoh kecil bebas cacat dan contoh uji berukuran penuh.

3.6. Faktor Stabilitas Balok (CL)

Stabilitas balok dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kondisi pembebanan dan tumpuan, penampang komponen struktur, dan panjang tak tertumpu [12]. Balok yang memiliki permukaan lebar akan menjadi lebih stabil jika dibandingkan dengan balok langsing. Balok yang langsing dan memiliki ukuran yang lebih panjang mengakibatkan balok tersebut mengalami puntiran, sehingga diperlukan tumpuan lateral agar balok menjadi lebih stabil ketika menerima beban [13].

Tabel 8. Nilai stabilitas balok ontok uji berukuran penuh acuan dan aktual.

Jenis Kayu	Rasio Kelangsingan	Stabilitas Balok	
		Acuan	Aktual
Agathis	7.48	1	0.99
Pinus	7.45	1	0.97
Mahoni	7.40	1	0.98
Meranti	7.66	1	0.99

Tabel 8 menunjukkan nilai rasio kelangsingan (R_B) pada kayu agathis, pinus, mahoni, dan meranti masing-masing sebesar 7.48, 7.45, 7.40, dan 7.66. Nilai rasio kelangsingan pada masing-masing kayu pada penelitian ini menunjukkan bahwa balok agathis, pinus, meranti dan mahoni termasuk balok

pendek. Contoh uji berukuran penuh yang diberikan satu beban terpusat dikategorikan sebagai balok pendek ($R_B \leq 10$). Rasio kelangsingan yang berkisar antara 10 hingga 20, spesimen menunjukkan karakteristik balok atau kolom pendek [48]. Nilai R_B contoh uji berukuran penuh pada pengujian ini dipengaruhi oleh ukuran penampang balok dan tumpuan lateral. Semakin banyak titik beban dan tumpuan lateral, nilai panjang tak tertumpu (l_u) semakin tinggi, sehingga nilai R_B semakin rendah. Adanya peningkatan nilai R_B menyebabkan beban ultimit yang diberikan pada balok juga meningkat. Begitu juga sebaliknya, penurunan nilai R_B mengakibatkan beban yang dipikul lebih rendah [49].

Tabel 6 juga menunjukkan bahwa nilai stabilitas balok acuan (C_L) pada kayu agathis, pinus, mahoni, dan meranti masing-masing sebesar 1. Nilai C_L pada kayu agathis, pinus, mahoni, dan meranti masing-masing sebesar 0.99, 0.97, 0.98 dan 0.99. Nilai C_L aktual lebih beragam dibandingkan dengan nilai C_L acuan karena beberapa faktor seperti nilai koefisien variasi yang lebih tinggi terhadap nilai elastisitasnya dan kekuatan lentur yang dijadikan sebagai nilai desain acuan lentur pada C_L aktual. Selain itu, pada pengujian ini menunjukkan bahwa rasio kelangsingan juga mempengaruhi nilai stabilitas balok. Semakin rendah nilai rasio kelangsingan, maka nilai stabilitas balok akan mendekati satu atau sama dengan satu. Nilai stabilitas kayu dipengaruhi oleh rasio kelangsingan (R_B), rasio modulus elastisitas terhadap kekuatan lentur (E/S_R), rasio daktilitas (μ), dan rasio kekuatan (S) [50].

4. Kesimpulan

Nilai modulus elastisitas (E) pada kayu daun jaum (agathis dan pinus) memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai E pada kayu daun lebar. Adanya cacat-cacat kayu pada contoh uji berukuran penuh, menyebabkan kelas mutu masing-masing kayu menurun. Agathis dikategorikan ke dalam kelas mutu E6, pinus kelas mutu E5, meranti kelas mutu E8, dan mahoni kelas mutu E5 berdasarkan SNI 2013. Nilai stabilitas balok (C_L) mendekati 1 yang mengindikasikan bahwa balok stabil dan tidak mengalami puntiran.

Daftar Pustaka

- [1] Adebara SA, Haruna H, Shittu MB, Anifowose MA. Quality and utilization of timber species for building construction in Minna, Nigeria. *The Internat J Engine And Sci.* 2014; 3(5): 46-50.
- [2] Joseph P, Tretsiakova-McNally S. Sustainable non-metallic building materials. *Sustainability.* 2010; 2(2): 400–427. doi: 10.3390/su2020400.
- [3] Silva DAL, Lahr FAR, Faria OB, Chahud E. Influence of wood moisture content on the Modulus of Elasticity in compression Parallel to the grain. *Material Research.* 2021; 15(2): 300-304. doi: 10.1590/S1516-14392012005000025.
- [4] Wieruszewski M, Mazela B. Cross laminated timber (CLT) as an alternative form of construction wood. *Drvna Industrija.* 2017; 68(4): 359-367. doi: 10.5552/drind.2017.1728.
- [5] Ramage MH et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. *J Renew and sustain energy.* 2017; 68: 333-359. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
- [6] Kuzman MK, Groselj P. Wood as a construction material: comparison of different construction types for residential building using the analytic hierarchy process. *Wood Res.* 2012; 57(4): 591–600.
- [7] Høibø O, Hansen E, Nybakk E. Building material preferences with a focus on wood in urban housing: durability and environmental impacts. *Canadian J Forest Res.* 2015; 45(11): 1617–

1627. doi: 10.1139/cjfr-2015-0123.
- [8] Lapeantu SK, Hapid A, Muthmainnah. 2017. Sifat mekanika kayu pinus (*Pinus merkusii* Jungh et de Vriese) asal desa Taende Mori Atas Morowali Utara Sulawesi Tengah. *Warta Rimba*. 5(1): 121-126.
- [9] Simpson WT. 1999. *Wood Handbook—Wood as An Engineering Material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison (US): Forest Products Laboratory.
- [10] Fernandes A, Saridan A. 2013. Sifat fisik dan mekanik kayu *Shorea macroptera* ssp. *Sandakanensis* (Sym.) Ashton sebagai bahan baku mebel. *J Penelit Dipterokarpa*.7(1): 1-6. doi: 10.20886/jped.2013.7.1.1-6.
- [11] Asroni A. 2008. *Kolom Pondasi dan Balok T Beton Bertulang*. Surakarta (ID): Universitas Muhammadiyah.
- [12] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2013. SNI 7973:2013 Spesifikasi Desain untuk Kontruksi Kayu. Jakarta (ID): BSN.
- [13] [AWC] American Wood Council. 2011. *ANSI/NDS 2012: National Design Specification for Wood Construction 2012*. Leesburg(USA): The American Wood Council.
- [14] Richard MJ. 2013. *Assessing the performance of bamboo structural components [Disertasi]*. Pittsburgh (GB): University of Pittsburgh.
- [15] Nolan R. 2010. *Determining Allowable Design Values for Wood*. New York (US): American Forest and Paper Association and American Wood Council.
- [16] [ASTM] American Society for Testing and Material. 2005. *Annual Book of ASTM Standard. Volume 0410. Wood. D-143-94 (Reapproved 2000): Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohocken(US): ASTM International.
- [17] [ASTM] American Society for Testing and Material. 2002. *Annual Book of ASTM Standard. Wood. D-245-00 (Reapproved 2002): Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*. West Conshohocken(US): ASTM International.
- [18] [ASTM] American Society for Testing and Material. 2005. *Annual Book of ASTM Standard volume 0410. Wood D-198-05 (Reapproved 2000): Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohocken(US): ASTM International.
- [19] Brown HP, Panshin AJ, Forsaith CC. 1952. *Textbook of Wood Technology*. New York (US): McGraw Hill.
- [20] Glass SV, Zelinka SL. 2010. *Moisture Relations and Physical Properties of Wood*. Di dalam: [FPL] Forest Product Laboratory. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison (US): Departement of Agriculture.
- [21] Kasmujo. 2001. *Identifikasi Kayu dan Sifat-sifat Kayu*. Jakarta(ID): Kanisius.
- [22] Bowyer JL, Haygreen JG, Shmulsky R. 2003. *Forest Products and Wood Science:An Introduction*. Iowa (US): IOWA State Press Blackwell Publishing.

- [23] Damanik RIM. Kekuatan Kayu. Medan(ID): USU. 2005.
- [24] Basri, E. dan Y.I. Mandang. Pengeringan kayu: Pentingnya pemahaman sifat-sifat kayu untuk mendukung teknologi pengolahan. [Prosiding]: Diskusi Teknologi Pemanfaatan Kayu Budidaya untuk Mendukung Industri Perakayuan yang Berkelanjutan. 7 November 2001: 261-268. Bogor (ID): Pusat Litbang Teknologi Hasil Hutan. 2001.
- [25] Marsoem SN, Prasetyo VE, Sulistyio J, Sudaryono, Lukmandaru G. Studi mutu kayu jati di hutan rakyat gunung kidul III. Sifat fisika kayu. Jurnal Ilmu Kehutanan. 2014; 8(2): 75-88.
- [26] Ruhendi S, Koroh DN, Syamani FA, Yanti H, Nurhaida, Saad S, Sucipto T. Analisis Perekatan Kayu. Bogor (ID): IPB Press. 2007.
- [27] Alokabel K, Lay YE, Wonlele T. Penentuan kelas kuat lokal di pulau Timor sebagai bahan konstruksi. JUTEKS. 2(2): 139-148. doi: 10.32511/juteks.v2i2.168.
- [28] Bahtiar ET. Keandalan modulus of elasticity (MOE) untuk menduga kekuatan kayu bercacat akibat lubang bor. JTHH. 2005; 18(2): 80-90.
- [29] Nowak T, Patalas F, Karolak A. Estimating mechanical properties of wood in existing structures- selected aspects. Materials. 2021; 14: 1-26. doi: 10.3390/ma14081941.
- [30] Ridley-Ellis D, Stapel P, Baño V. Strength grading of sawn timber in Europe: An explanation for engineers and researchers. European Journal of Wood and Wood Products. 2016; 74: 291-306. doi: 10.1007/s00107-016-1034-1.
- [31] Bodig J, Jayne BA. Mechanics of Wood and Wood Composite. Florida (US): Van Nostrand Reinhold Company. 1982.
- [32] Chauf KA, Dewi SM. Structural efficiency and flexural strength of mix-glulam timber beams are composed of sengon and coconut wood as green material construction. [Proceeding]: International Multidisciplinary Conference 2016. November 15th, 2016: 362-370. Malang (ID): Brawijaya University. 2016.
- [33] Ross RJ. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madisan (USA): Departement of Agriculture Forest Products Laboratory. 2010.
- [34] Awaludin A. Dasar-dasar Perencanaan Sambungan Kayu. Yogyakarta (ID) : Universitas Gadjah Mada. 2005.
- [35] Glos P. Strength Grading. Amsterdam (NL): Centrum Heut. 1994.
- [36] Kistiani F. Tinjauan kuat tekan dan kuat tarik kayu berdasarkan PKKI 1961, SNI M. 27-1991-03 dan SNI M. 25-1991-03. Media Komunikasi Teknik Sipil. 2006; 14(2): 206-213.
- [37] Rocha MFV, Costa LR, Costa LJ, Caxito AC, Soares BCD, Hein PRG. Wood knots influence the modulus of elasticity and resistance to compression. Floresta e Ambiente. 2018; 25(4): 1-6. doi: 10.1590/2179-8087.090617.
- [38] Ravenshorst GJP. Species independent strength grading of structural timber. [Disertation]. Delft (NL): Technische Universiteit Delft. 2015.
- [39] Mardikanto TR, Karlinasari L, Bahtiar ET. Sifat Mekanis Kayu. Bogor (ID): IPB Press. 2011.

- [40] Otaya LG. Distribusi probabilitas weibull dan aplikasinya. *Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*. 2016; 4(2): 44-66.
- [41] Firmanti A, Bahtiar ET, Surjokusumo S, Komatsu K, Kawai S. Mechanical stress grading of tropical timbers without regard to species. *J wood Sci*. 2005; 51(1): 339-347. doi: 10.1007/s10086-004-0661-z.
- [42] Johannes AJH, Ekevad M, Girhammar UA, Berg S. Structural robustness of timber buildings- a review. *Wood Material Science and Engineering*. 2018; 14(2): 107-128. doi: 10.1080/17480272.2018.1446052.
- [43] Jorissen A, Fragiacomio M. General notes on ductility in timber structures. *Eng Struct*. 2011; 33(1):2987-2997. doi: 10.1016/j.engstruct.2011.07.024.
- [44] Tomasi R, Parisi MA, Piazzza M. Ductile design of glued-laminated timber beams. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2009; 14(3): 113-122. doi: 10.1080/17480272.2018.1446052.
- [45] Sulistiyawati I, Nugroho N, Surjokusumo S, Hadi YS. The bending strength of vertical and horizontal glued laminated lumber by transform cross section method. *J. Trop Wood Sci. Technol*. 2008; 6(2): 49-55.
- [46] Iswanto AH. *Pengujian Modulus Elastisitas Kayu dengan Menggunakan Two Point Loading*. Medan (ID): USU. 2008.
- [47] Gelder HA, Poorter L, Sterck FJ. Wood mechanics, allometry, and lifehistory variation in a tropical rain forest tree community. *New Phytol*. 2006; 171(1):367-378. doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01757.x.
- [48] Nie Y, Wei Y, Huang L, Liu Y, Dong F. Influence of slenderness ratio and sectional geometry on the axial compression behavior of original bamboo columns. *J Wood Sci*. 2021; 67(36):1-20. doi: 10.1186/s10086-021-01968-6.
- [49] Patel V, Liang QQ, Hadi MNS. Numerical analysis of high-strength concrete-filled steel tubular slender beam-columns under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 92: 183-194. doi: 10.1016/j.jcsr.2013.09.008.
- [50] Hidayatullah H. *Stabilitas balok kayu yang menerima pembebanan lentur terpusat di beberapa titik*. [Tesis]. Bogor (ID): IPB. 2021.

