

Kuat Lentur Balok Laminasi Kombinasi Kayu Jawa (*Lannea coromandelica*) dan Gelugu (*Cocos nucifera*)

K.A. Chauf^{a*}, S. Nurdin^a, A. Dolu^a dan Armabelio^b

^aJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Jl. Soekarno-Hatta Km 9, Palu 94118, Indonesia

^bAlumni Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Jl. Soekarno-Hatta Km 9, Palu 94118, Indonesia

*Corresponding author's e-mail: kus_untad@yahoo.co.id

Received: 6 May 2024; revised: 22 June 2024; accepted: 6 July 2024

Abstract: The use of kayu Jawa (*Lannea coromandelica*) and gelugu (*Cocos nucifera*) is very necessary to reduce the forests exploitation as a source of wood raw materials. However, both have debility in terms of mechanical properties and maximum dimensional achievement. Therefore, a mixed glulam system can be applied to produce lightweight structural timber beams with adequate performance. This research is aimed at determining the flexural strength, stiffness, ductility and failure of mixed glulam beams combined with kayu Jawa and Gelugu. A series of bending tests were carried out on timber beams using the three point bending method on three categories of beams, namely B-J, B-G and B-L. B-J beams, consist of solid timber of kayu jawa which has density $\pm 0,60 \text{ gr/cm}^3$, B-K consist of solid gelugu which has density $\pm 0,88 \text{ gr/cm}^3$, while B-L consists of kayu jawa timber in the core zone and one layer of 10 mm thick gelugu with a density of $0,88 \text{ gr/cm}^3$ on the tension zone. Each beams category consists of five replications with the dimensions of each beam being 50 mm of wide, 55 mm of high and 760 mm of span. Laminated beams (B-L) are glued with emulsion adhesive with Viscosity 2,500 – 4,500 cPS, resin content 90 – 91%, gel time: 1 hour and curing time 5 – 6 hours with two-sided coating of 250 gr/m^2 and clamping force 2 MPa. The results of this research show that the flexural strength (f_b) and stiffness (EI) of mixed glue laminated beams are 1,3 times higher than B-J. Apart from that, mixed glue laminated beams (B-L) there was an increase the ductility of 47% when compared to B-G.

Keywords: mixed glue laminated beams, *Lannea coromandelica*, *Cocos nucifera*, flexural strength of wood

Abstrak: Pemanfaatan kayu jawa (*Lannea coromandelica*) dan gelugu (*Cocos nucifera*) sangat diperlukan untuk mengurangi eksploitasi hutan alam sebagai sumber bahan baku kayu. Namun, keduanya memiliki kekurangan dari segi nilai sifat mekanik dan capaian dimensi maksimum. Oleh sebab itu, sistem laminasi kombinasi dapat diterapkan agar dapat dihasilkan balok kayu struktural yang ringan dengan kinerja yang memadai. Atas dasar itu, maka penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kuat lentur, kekakuan, daktilitas dan pola keruntuhan balok laminasi kombinasi kayu jawa dan gelugu. Untuk itu dilakukan serangkaian pengujian lentur balok kayu dengan metode *three point bending* terhadap tiga kategori balok yaitu B-J, B-G dan B-L. Balok B-J terdiri dari balok solid kayu jawa dengan kerapatan $\pm 0,60 \text{ gr/cm}^3$, B-K terdiri balok solid gelugu dengan kerapatan $\pm 0,88 \text{ gr/cm}^3$ sedangkan B-L terdiri dari kayu jawa di bagian inti dan satu lapis gelugu setebal 10 mm dengan kerapatan $0,88 \text{ gr/cm}^3$ di sisi bawah. Setiap kategori terdiri dari lima ulangan dengan dimensi masing-masing balok adalah lebar 50 mm, tinggi 55 mm dan bentang 760 mm. Balok laminasi (B-L) direkatkan dengan bahan perekat emulsi siap pakai dengan Viscosity 2,500 – 4,500 cPS, Kadar Resin 90 – 91%, *Gel Time*: 1 jam dan *Curing Time* 5 – 6 jam dengan pelaburan dua sisi sebanyak 250 gr/m^2 dan gaya kempa 2 MPa. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kuat lentur (f_b) dan kekakuan (EI) balok laminasi B-L lebih tinggi dibanding B-J sebesar 1,3 kali. Selain itu pada balok laminasi (B-L) terjadi peningkatan daktilitas sebesar 47% jika dibandingkan dengan B-G.

Kata kunci: balok laminasi kombinasi, kayu jawa, gelugu, kuat lentur kayu

1. Pendahuluan

Kayu sebagai bahan konstruksi bersifat *sustainable* dan ramah lingkungan karena merupakan hasil alam yang mudah diperoleh dan diproses, apalagi jika dibantu oleh teknologi pengolahan kayu modern [1]. Sebagai bahan konstruksi, umumnya kayu diaplikasikan pada bangunan rumah tinggal, bangunan gedung, struktur atas jembatan dan bantalan kereta api [2], [3]. Tata kelola hutan lestari yang mengharuskan adanya reboisasi serta peremajaan tanaman nonproduktif dapat menghasilkan peningkatan *sustainability* kayu sebagai bahan konstruksi [4].

Selain bersifat *sustainable*, bahan kayu juga memiliki tingkat konsumsi energi dan kontribusi terhadap penyebab pemanasan global yang lebih rendah jika dibandingkan dengan beton, baja dan aluminium [5]. Selain kedua hal

itu, kayu juga memiliki nilai *strength-density ratio* atau nilai efisiensi struktural yang baik. Tabel 1 menunjukkan peta karakteristik beberapa bahan konstruksi dalam konteks pengaruhnya terhadap lingkungan [6]. Atas dasar hal tersebut, maka perlu didorong penggunaan kayu sebagai bahan konstruksi, dengan penentuan kelas/ mutu kayu dapat dilakukan dengan berdasarkan kekuatan dan modulus elastisitas kayu [7].

Dewasa ini, penggunaan kayu di Indonesia diarahkan pada pemanfaatan kayu non-hutan untuk mengurangi deforestasi hutan [8]. Salah satu jenis tanaman yang potensial, adalah kelapa (*Cocos nucifera*) sebagai penghasil gelugu. Kurang lebih 26% luas perkebunan kelapa dunia ada di Indonesia, dengan potensi gelugu mencapai 9 juta m^3 per tahun [9]. Gelugu merupakan

produk gergajian dari penebangan pohon kelapa nonproduktif umur 50-80 tahun. Gelugu yang layak untuk komponen struktural adalah yang berkerapatan kering udara (ρ_{12}) antara 0,6 - 0,9 gr/cm³ dengan modulus

elastisitas (MOE) 11.000 - 17.000 MPa [10]. Namun demikian, gelugu memiliki kelemahan dalam pencapaian dimensi balok, karena kerapatannya sangat heterogen dalam arah radial pertumbuhan tanaman.

Tabel 1. Efisiensi struktural dan pengaruh bahan konstruksi terhadap lingkungan

<i>Material</i>	<i>Embodied energy</i> ^(a) (GJ/m ³)	<i>Global Warming Potential</i> ^(b) (kg/m ³)	<i>Strength /Density</i> ^(b) (10 ⁻³ MPa.m ³ / kg)
<i>Aluminium</i>	497	29.975	40-110
<i>Concrete</i>	4,8	156	13-50
<i>Steel</i>	200	17840	50-130
<i>Wood</i>	1,65	64	30-80

Disamping kelapa, juga yang potensial dikembangkan adalah jenis kayu jawa (*Lannea coromandelica*) yang termasuk jenis kayu cepat tumbuh dengan masa panen 6-8 tahun. Namun untuk penggunaan bahan struktural bangunan, kayu jawa memiliki banyak kelemahan berupa cacat alami dan panjang yang sangat terbatas. Keterbatasan

Tabel 2 memberikan gambaran mengenai keunggulan balok kayu laminasi jika dibandingkan dengan kayu solid.

Tabel 2. Perbedaan balok kayu solid dan balok kayu laminasi [11]

Aspek	Balok Solid	Balok Laminasi
Capaian dimensi	Terbatas, tergantung diameter tanaman asal	Dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan memungkinkan penggunaan pohon berdiameter kecil
Pengaruh cacat dan variasi kerapatan	Tidak dapat mereduksi efek pemusatan cacat	Pengaturan lamina dapat mereduksi pemusatan cacat dengan distribusi yang lebih menyebar

Kombinasi kayu jawa - gelugu diharapkan akan menghasilkan balok laminasi struktural yang memiliki kuat lentur dan kekakuan yang memadai. Dalam hal, kuat lentur balok laminasi kombinasi yang berasal dari jenis kayu berbeda, berada dalam kisaran kuat lentur bahan penyusunnya [12]. Peningkatan kuat lentur balok laminasi atau disebut sebagai *laminating effect* berkisar 1,06 - 1,59 untuk *European glulam* dan 0,95 - 2,51 untuk *North American glulam* [13].

2. Metode Penelitian

Bahan utama penelitian ini adalah masing-masing 5 batang balok kayu jawa dan gelugu dengan panjang 200 cm, lebar 6 cm dan tinggi 10 cm sebagaimana Gambar 1. Lima batang balok kayu jawa diperoleh dari hasil penebangan 3 pohon yang berusia ±7 tahun, sedangkan lima batang balok gelugu diperoleh dari pasaran. Kayu jawa dipilah secara visual untuk memperoleh bahan penelitian yang memiliki cacat bawaan minimal, terutama mata kayu, sedangkan bahan gelugu dipilah secara mekanis untuk mendapatkan kayu dengan kerapatan yang relatif seragam. Selanjutnya masing-masing bahan utama itu dikering anginkan selama 30 hari sampai tercapai kadar air kering udara (ρ_{12}) sebesar ± 12%.

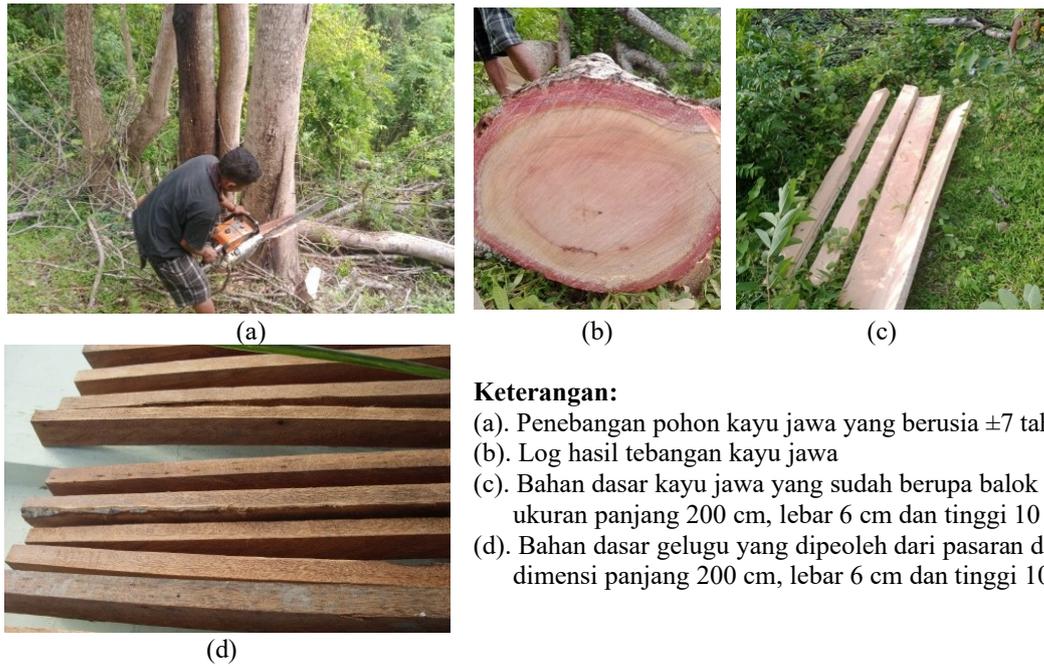
Setelah kedua jenis bahan mencapai kondisi kering udara, kemudian masing-masing dibuat menjadi 5 benda uji berupa balok solid kayu jawa (B-J) dan balok solid gelugu (B-G) dengan dimensi bersih masing-masing

dan kelemahan jenis kayu cepat tumbuh itu menyebabkan kayu jawa tidak direkomendasikan untuk pemanfaatan struktural. Untuk itu, peningkatan taraf penggunaannya ke level struktural harus dilakukan dengan sistem balok laminasi kombinasi (*mixed-glulam*).

adalah lebar 50 mm, tinggi 55 mm dan panjang 850 mm. Khusus untuk pembuatan balok laminasi (B-L), digunakan 5 lembar papan gelugu hasil pemilahan mekanis dengan panjang 2000 mm, lebar 60 mm dan tebal 10 mm dan 5 batang balok kayu jawa dengan panjang 2000 mm, lebar 60 mm dan tinggi 55 mm. Sebagai perekat digunakan bahan perekat emulsi siap pakai dengan *Viscosity* 2,500 - 4,500 cPS, *Kadar Resin* 90 - 91%, *Gel Time*: 1 jam dan *Curing Time* 5 - 6 jam.

Pembuatan balok solid (B-J dan B-G) masing-masing dengan menggunakan mesin planner sampai tercapai dimensi yang direncanakan sebagaimana Gambar 2, sekaligus membersihkan permukaan sisi-sisi setiap balok. Adapun untuk pembuatan balok laminasi kombinasi (B-L) melalui tiga tahapan yaitu:

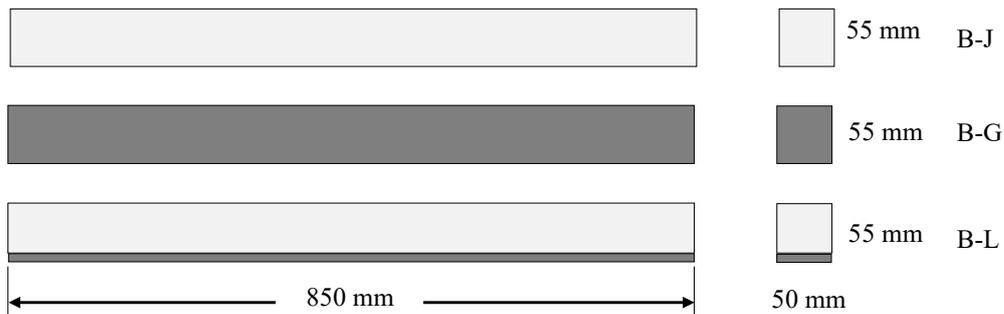
- 1) Papan gelugu diratakan pada dua permukaan lebar sehingga tercapai ketebalan 1 cm dan lebar 6 cm;
- 2) Balok kayu jawa diplaner pada dua sisi lebarnya sampai tercapai ketinggian 4,5 cm dan lebar 6 cm;
- 3) Dilakukan proses perekatan dan pengempaan dengan intensitas gaya kempa 2 MPa sebagaimana disajikan dalam Gambar 3. Dalam hal ini jumlah perekat terlabur adalah 250 gr/ m² dengan durasi pelaburan maksimal 10 menit untuk setiap balok; dan
- 4) Setelah minimal 6 jam, klem dibuka, kemudian balok laminasi diplaner kembali pada dua sisi tingginya sehingga tercapai lebar bersih balok laminasi 5 cm.



Keterangan:

- (a). Penebangan pohon kayu jawa yang berusia ± 7 tahun
- (b). Log hasil tebangan kayu jawa
- (c). Bahan dasar kayu jawa yang sudah berupa balok ukuran panjang 200 cm, lebar 6 cm dan tinggi 10 cm.
- (d). Bahan dasar gelugu yang dipeoleh dari pasaran dengan dimensi panjang 200 cm, lebar 6 cm dan tinggi 10 cm.

Gambar 1. Proses pengolahan bahan kayu jawa (*Lannea coromandelica*) dan gelugu (*Cocos nucifera*)



B-J = Balok Solid Kayu Jawa

B-G = Balok Solid Gelugu

B-L = Balok Laminasi Kombinasi Kayu Jawa-gelugu (Tebal lapisan gelugu = 10 mm, dan Kayu Jawa 450

Gambar 2. Geometri dan variasi benda uji balok



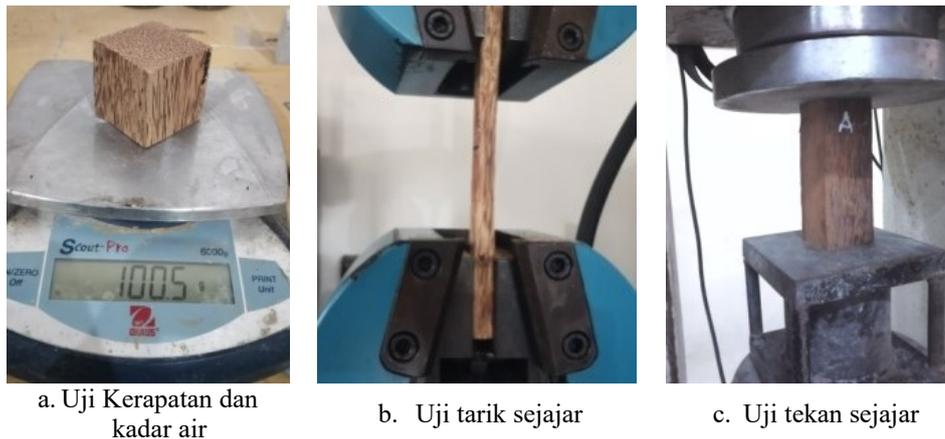
a. Pelaburan perekat

b. Proses kempa dan pematangan perekatan

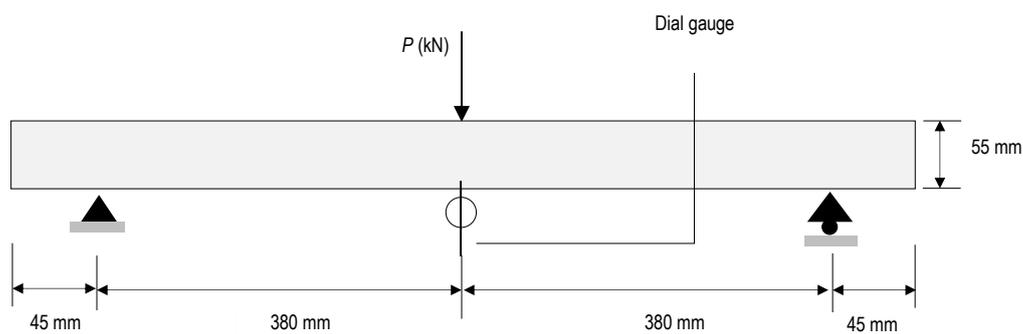
Gambar 3. Perekatan dan pengempaan balok laminasi (BL)

Sebelum dilakukan uji lentur benda uji balok sebagaimana **Gambar 5**, terlebih dahulu dilakukan uji kuat tarik dan tekan sejajar masing-masing untuk kayu jawa dan gelugu mengikuti prosedur ASTM-D143-2014 [14]. Adapun kuat lentur balok ditentukan melalui uji lentur statik dengan mekanisme pembebanan *three point bending*

menurut ASTM. D198 – 02, [15]. Konfigurasi instrumen uji lentur balok disajikan pada **Gambar 4**. Setiap pengujian dilakukan laju pembebanan 2 kN/menit dan menjelang runtuh kecepatan dikurangi menjadi 1 kN/menit. Pada setiap pembebanan dicatat lendutan di tengah bentang menggunakan *dial gauge*.



Gambar 4. Pemeriksaan kerapatan kering udara dan uji pendahuluan sifat dasar kayu



Gambar 5. Setup uji lentur balok

Penentuan kekakuan (EI) didasarkan pada hasil pengukuran lendutan pada pengujian lentur statik sistem *three point bending* (Gambar 5). Penentuan EI dilakukan dengan Persamaan 3 [16] yang merupakan model balok pada kondisi lentur murni. Dalam hal ini digunakan asumsi bahwa lendutan geser yang terjadi selama pembebanan diabaikan. Pengabaian lendutan geser dapat dilakukan jika rasio bentang terhadap tinggi balok (L/h) lebih dari 12,6. Dalam hal ini L/h benda uji balok yang diaplikasikan adalah 15,2.

$$EI = \frac{P \cdot L^3}{48 \Delta_c} \quad (1)$$

dengan:

- Δ_c = lendutan balok di tengah bentang pada fase linier (mm)
- P = beban yang bersesuaian dengan Δ_c (N)
- L = bentang balok (mm)
- E = modulus elastisitas bahan (MPa)
- I = momen inersia penampang balok (mm^4)

Kuat lentur balok kayu sebagai parameter daya dukung biasanya dinyatakan dengan tegangan lentur maksimum. Oleh karena kuat lentur balok laminasi sangat dipengaruhi oleh kuat tarik bahan kayu yang digunakan, maka penentuannya dapat ditentukan menurut Persamaan 3. Kedua persamaan ini hanya berlaku jika balok mengalami keruntuhan lentur mode I atau *simple tension failure*.

$$M_{\max} = \frac{1}{4} P_{\max} \cdot L \quad (2)$$

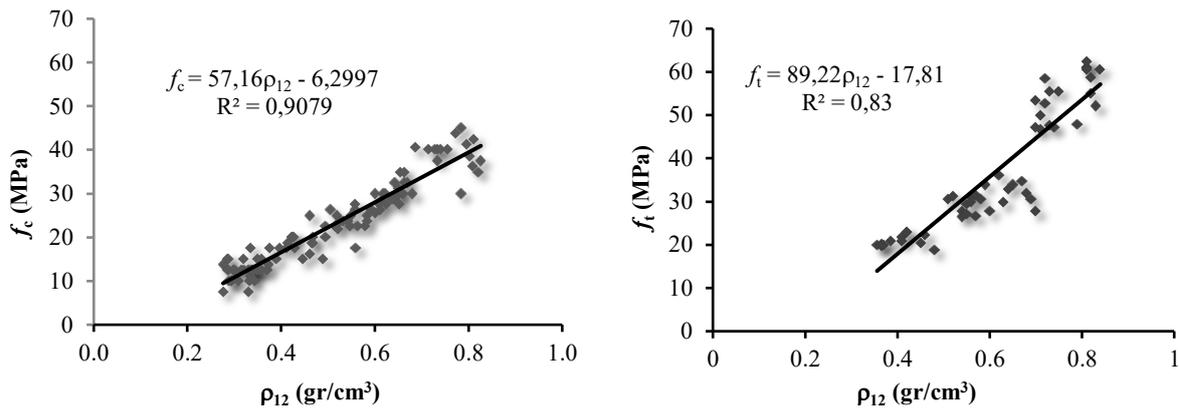
$$f_b = \frac{M_{\max} \cdot y}{I} \quad (3)$$

- f_b = kuat lentur balok (MPa)
- y = jarak garis netral terhadap sisi terluar balok (mm)
- M_{\max} = momen lentur maksimum di tengah bentang (kN.m)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Sifat Mekanik Gelugu dan Kayu Jawa pada Kondisi Kering Udara

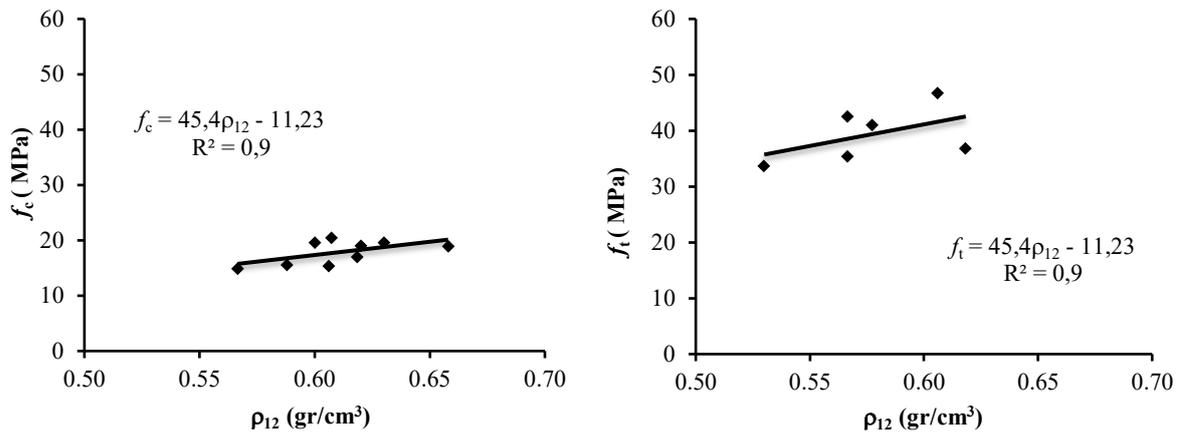
Kerapatan rata-rata gelugu pada kondisi kering udara (ρ_{12}) terdiri atas tiga kategori berdasarkan posisi zona radial tegakan pohon, yaitu: 1) kerapatan rendah sebesar $0,54 \text{ gr/cm}^3$ (zona inti tegakan); 2) kerapatan sedang sebesar $0,69 \text{ gr/cm}^3$ (zona pertengahan arah radial tegakan); dan 3) kerapatan tinggi sebesar $0,88 \text{ gr/cm}^3$ (zona tepi dan kulit tegakan). Masing-masing nilai kerapatan itu berkorelasi dengan kuat tekan sejajar (f_c) dan kuat tarik sejajar (f_t), sebagaimana Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6 itu, maka lapisan gelugu yang diperlukan untuk memberikan efek perkuatan balok kayu jawa adalah yang memiliki kerapatan sedang sampai dengan tinggi (kategori 2 dan 3). Untuk kebutuhan praktis, persamaan regresi yang diperoleh pada Gambar 6, dapat dijadikan dasar untuk melakukan estimasi nilai kuat tekan dan tarik sejajar gelugu berdasarkan data kerapatan saja, tanpa melakukan uji sifat mekanik.



Gambar 6. Hubungan kerapatan dengan sifat mekanik gelugu pada kondisi kering udara

Berbeda dengan gelugu, pemeriksaan kayu jawa menunjukkan nilai kerapatan kering udara (ρ_{12}) yang lebih homogen yaitu antara 0,57 - 0,66 gr/cm³ sebagaimana disajikan dalam Gambar 7. Sebagaimana halnya dengan gelugu, maka untuk kebutuhan praktis, persamaan regresi

yang diperoleh pada Gambar 7, dapat dijadikan dasar untuk melakukan estimasi nilai kuat tekan dan tarik sejajar bahan kayu jawa berdasarkan data kerapatan saja, tanpa melakukan uji sifat mekanik.



Gambar 7. Hubungan kerapatan dengan kuat tekan dan kuat tarik kayu jawa

Tabel 3. Sifat Mekanik Gelugu, Kayu Jawa dan Balok Laminasi

No. Kode	Jenis Kayu	Kuat Tarik, f_t^* (Mpa)	Kuat Tekan, f_c^* (Mpa)	Kuat Lentur, f_b^{**} (Mpa)
1	Kelapa (kategori 2)	49,9	34,9	68,4
2	Kayu Jawa	40,4	16,4	44,1
3	Laminasi Kombinasi	-	-	56,6

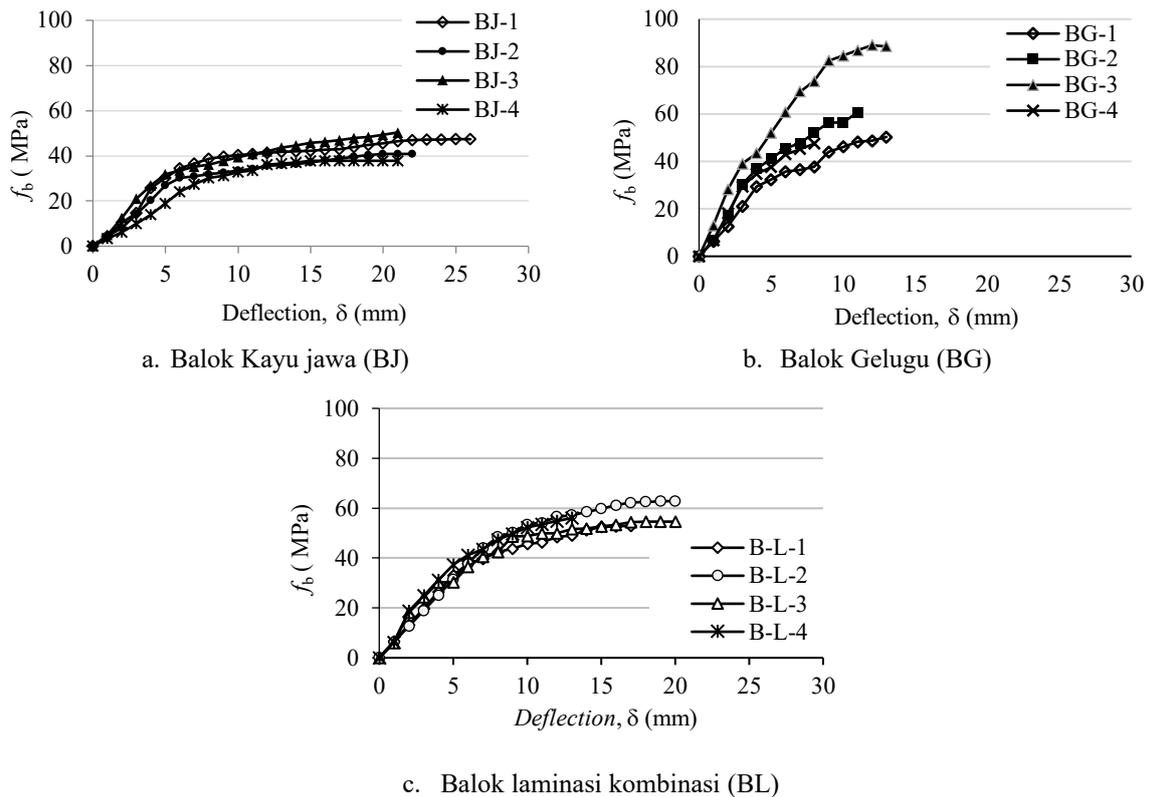
* Diperoleh dari hasil uji pendahuluan bahan

** Diperoleh dari hasil uji lentur balok

3.2. Perilaku Lentur Balok

Pola hubungan tegangan dan lendutan untuk setiap balok memiliki kecenderungan yang sama, baik pada balok kayu solid (B-J dan B-G) maupun balok laminasi (B-L). Berdasarkan Gambar 8, diketahui bahwa trend kurva tegangan dan lendutan setiap balok diawali dengan fase linier sampai pada batas tegangan proporsional, kemudian memasuki fase nonlinier sampai tercapai tegangan maksimum. Pada balok solid gelugu (B-G), tegangan

maksimum yang tercapai rata-rata lebih tinggi jika dibandingkan dengan balok kayu jawa, namun lebih bervariasi karena kerapatan gelugu yang juga sangat bervariasi sebagaimana Gambar 8b. Ini merupakan salah satu kekurangan gelugu, jika akan dimanfaatkan sebagai balok solid dalam dimensi struktural. Oleh karena itu pemilahan mekanis gelugu sangat menentukan kuat lentur balok yang dihasilkan.



Gambar 8. Hubungan tegangan dan lendutan balok kayu

Selanjutnya, dengan menempatkan lapisan gelugu pada sisi tarik balok kayu jawa, terlihat bahwa terjadi peningkatan kuat lentur jika dibandingkan dengan kuat lentur balok kayu jawa (BG). Hasil pengujian benda uji balok menunjukkan bahwa kuat lentur balok laminasi (B-L) adalah 1,3 kali lebih tinggi dibanding balok solid kayu jawa (B-J). Atau dapat dikatakan bahwa penempatan satu lapis gelugu pada bagian bawah atau sisi tarik balok solid kayu jawa dapat meningkatkan kuat lentur sebesar 30%, sebagaimana juga disajikan dalam Tabel 3. Meskipun demikian, capaian nilai kuat lentur balok laminasi tersebut masih lebih rendah dari kuat lentur balok gelugu, dimana $f_{b-laminasi} = 0,82 f_{b-gelugu}$.

Berdasarkan lendutan maksimum rata-rata yang tercapai oleh balok kayu jawa (B-J), gelugu (B-G) dan balok laminasi (B-L) berturut-turut adalah 22,5 mm, 11,25 mm dan 17,5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan gelugu adalah 2,3 kali lebih tinggi daripada kekakuan kayu jawa, dan kekakuan balok laminasi (B-L) 1,3 kali lebih tinggi dari kekakuan balok kayu jawa, namun tidak demikian dengan daktilitas balok. Gambar 8 menunjukkan fenomena tersebut, dimana berdasarkan daktilitas balok atau rasio lendutan maksimum dan lendutan proporsional (δ_{max}/δ_p), maka terlihat bahwa kayu jawa jauh lebih daktil jika dibandingkan dengan gelugu. Dalam hal ini indeks daktilitas masing-masing balok berturut-turut adalah 1,50 untuk balok gelugu (BG); 2,20 untuk balok laminasi (B-L) dan 2,80 untuk balok kayu jawa (B-J). Dalam hal ini penempatan lapisan gelugu pada sisi tarik balok kayu jawa memberikan kontribusi positif bagi peningkatan kapasitas balok struktural dan kekakuannya. Selanjutnya jika ditinjau dari aspek pencapaian tegangan batas proporsional

masing-masing balok, maka penempatan lapisan gelugu di sisi tarik balok kayu jawa menghasilkan peningkatan nilai tegangan batas proporsional sebesar 30%. Gambar 8 menunjukkan fenomena tersebut, dimana berdasarkan daktilitas balok atau rasio lendutan maksimum dan lendutan proporsional (δ_{max}/δ_p), maka terlihat bahwa kayu jawa jauh lebih daktil jika dibandingkan dengan gelugu. Gambar 9. Zona elastis dan zona pasca elastis balok

3.3. Mekanisme Keruntuhan Balok

Jika kekakuan balok laminasi (B-K) lebih tinggi daripada kekakuan balok kayu jawa (B-G), maka hal sebaliknya justru terjadi pada daktilitasnya. Berdasarkan Gambar 9 diketahui bahwa daktilitas balok laminasi kombinasi (B-L) adalah 47% lebih tinggi daripada balok gelugu (B-K) dan 21% lebih kecil daripada daktilitas balok kayu jawa (B-G). Hal ini mempengaruhi pola keruntuhan masing-masing type balok.

Mode keruntuhan *simple tension failure* (mode I) terjadi pada seluruh balok solid gelugu maupun kayu jawa. Mode keruntuhan ini terjadi karena terdapat titik lemah di sisi tarik balok yang mencapai nilai tegangan tarik maksimum. Keruntuhan diawali oleh *initial fracture* di sisi tarik, namun tidak persis di titik momen maksimum tergantung letak titik terlemah sisi tarik masing-masing balok (10 - 15 cm dari tengah bentang). Ini merupakan indikasi adanya cacat bawaan pada kayu. Perbedaan mendasar dari pola keruntuhan gelugu dan kayu jawa adalah pada arah rambatan retaknya (*crack path*). Pada balok gelugu (B-G), setelah terjadi *initial fracture*, keretakan selanjutnya terjadi secara gradual ke arah

horizontal atau mengikuti arah serat. Hal ini merupakan salah satu kelebihan gelugu, karena memiliki orientasi arah serat yang cenderung lurus dan sejajar, sehingga keruntuhannya bisa lebih perlahan. Balok tidak segera kehilangan daya dukung ketika terjadi *initial fracture* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Keruntuhan lentur balok gelugu (B-G)

Pada balok kayu jawa (B-J), setelah terjadi *initial fracture*, keretakan selanjutnya terjadi secara mendadak ke arah vertikal menuju daerah tekan. Hal ini merupakan salah satu kekurangan kayu jawa, karena memiliki struktur serat yang berbeda dengan gelugu, sebagaimana halnya jenis kayu dikotil. Hal ini menyebabkan keruntuhan yang sangat mendadak dan bersifat eksplosif yang menyebabkan gagal rupture pada balok. Balok segera kehilangan daya dukung sesaat setelah terjadi *initial fracture* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kegagalan *rupture* (hancur) balok kayu jawa (B-J)

Adapun pada balok laminasi terjadi keruntuhan mode II berupa gagal tarik saat daerah tekan sudah mulai memasuki fase nonlinier sebagaimana Gambar 12. Keruntuhan diawali oleh *initial fracture* di sisi tarik pada lapisan gelugu, saat tercapai beban batas proporsional. *Initial fracture* ditandai oleh suara yang menunjukkan gejala putus serat. Disaat bersamaan, daerah tekan juga sudah mulai memasuki fase nonlinier, yang ditandai dengan gagal tumpu pada titik pembebanan. Pada Gambar 12 terlihat jelas bahwa kehancuran kayu jawa sebagaimana pada balok B-G tidak terjadi, meskipun ada perambatan retak pada daerah tengah bentang. Hal ini disebabkan oleh adanya efek *bumper* pada penempatan lapisan gelugu di sisi tarik balok, sehingga eksplosifitas kayu jawa berkurang. Apalagi jika melihat balok laminasi III, pada daerah kayu jawa tidak terjadi retakan, tetapi hanya defleksi yang maksimum dan gagal tumpu di sisi tekan balok.



Gambar 12. Keruntuhan lentur mode II balok laminasi

Kecuali pada pada balok laminasi II terjadi keruntuhan geser sebagaimana Gambar 13. Keruntuhan geser ini diawali oleh *fracture* pada daerah mata kayu, yang kemudian merambat menuju area dekat tumpuan. Kegagalan tipe ini sangat sulit untuk diprediksi, karena terjadi sangat mendadak dan disebabkan oleh cacat bawaan kayu yang sangat dominan. Terlihat jelas pada Gambar 13, bahwa balok telah gagal sebelum tercapai beban maksimum atau disebut *initial failure*. Namun secara keseluruhan, dari semua balok laminasi yang diuji tidak terjadi gagal pada perekatan.



Gambar 13. Kegagalan geser balok laminasi

4. Kesimpulan

Penerapan sistem laminasi kombinasi kayu jawa dan gelugu menghasilkan elemen balok struktural dengan kuat lentur dan kekakuan yang lebih baik daripada balok solid kayu jawa. Penempatan satu lapis papan gelugu pada sisi tarik balok kayu jawa dapat meningkatkan kuat lentur (f_b) dan kekakuan (δ_{max}) sebesar 1,3 kali lebih tinggi daripada kuat lentur dan kekakuan balok kayu jawa. Selain itu, sistem balok laminasi ini juga peningkatan daktilitas sebesar 47% jika dibandingkan dengan daktilitas gelugu. Adanya efek *bumper* merupakan salah satu kontribusi positif sistem laminasi, sehingga keruntuhan yang terjadi cenderung menjadi lebih perlahan dan bertahap.

Daftar Pustaka

- [1] C. Siagian, S.O. Dapas, and R.E. Pandaleke, "Pengujian Kuat Lentur Kayu Profil Tersusun Bentuk Kotak", *Jurnal Sipil Statik*, vol. 5, no. 2, p. 95, 2017.
- [2] M.N. Matana, E.J. Kumaat, and R.E. Pandaleke, "Pengujian Kuat Lentur Kayu Profil Tersusun Bentuk I", *Jurnal Sipil Statik*, vol. 5, no. 2, p. 103, 2017.
- [3] Pujianto, A. Basuki, and B. Utomo, "Uji Kuat Lentur Kayu dengan Tambalan Serbuk Gergaji, Serbuk Ketam dan Serbuk Amplasan Kayu", *Matriks Teknik Sipil*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2013.
- [4] J.M. Khatib, *Sustainability of Construction Materials*, Washington: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [5] M. Calkins. *Materials for Sustainable Sites, A Complete Guide to The Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] S. Thelandersson and H.J. Larsen, *Timber Engineering*, Singapore: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] A. Awaludin and U. Wusqo, "Prediksi Nilai Kuat Lentur Kayu Tropis Berdasarkan Nilai Modulus Elastis", *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, vol. 18, no. 1, p. 27, 2020.
- [8] BPS, *Statistik Indonesia 2010: Statistical Yearbook of Indonesia 2010*, Jakarta: Badan Pusat Statistik, 2010.
- [9] R.N. Arancon, *Asia Pacific Forestry Sector Outlook: Focus on Coconut Wood. 23 No. APFSOS/WP/23 ASIA*. Bangkok: WFA, 1997.
- [10] L. Fathi, *Structural and Mechanical Properties of the Wood from Coconut Palms, Oil Palms and Date Palms*, Hamburg: Fakultät Für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Universität Hamburg, 2014.
- [11] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook Wood as An Engineering Material*, New York: Department of Agriculture, 2010.
- [12] E. Serrano and H.J. Larsen, "Numerical Investigations of the Laminating Effect in Laminated Beams", *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, no. 7, p. 740, 1999.
- [13] R.H. Falk and F. Colling, "Laminating Effects in Glued-Laminated Timber Beams", *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, no. 12, p. 1857, 1995.
- [14] ASTM, *D143-14: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*, USA: ASTM International, 2014.
- [15] ASTM, *D.198-02: Standard Test Methods of Structural Size of Lumber*, USA: ASTM International, 2000.
- [16] J.M. Gere, *Mechanics of Materials*, USA: Thomson Learning, 2004.