

Perilaku Elastik Beban-Defleksi Balok Kayu Laminasi pada Pengujian Lentur

(Elastic Load-Deflection Behavior of Timber Laminated Beam on Flexural Test)

Fengky S Yoresta

Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

Penulis korespondensi: syfengky@gmail.com

Abstract

This research aims to understand the behavior of elastic bending curve on several types of timber laminated beams using bolts and combination of bolt-adhesive as connector among the timber layers. The beams are divided into types A, B, and C based on position of bolts and adhesive on beam. Flexural testing is conducted with *one-point loading* method using 5 tons capacity of Instron machine. The test results are then compared with theory of beam deflection by Euler-Bernoulli and Timoshenko. The research concludes that Timoshenko beam equation is accurate enough to predict the elastic behavior of beams. Deflection obtained from experiment is about two times larger than Euler-Bernoulli beam and not more than 1% error to Timoshenko.

Keywords: adhesive, bolts, elastic behavior, flexural testing, laminated beam

Abstrak

Penelitian ini bertujuan memahami perilaku kurva elastik lentur beberapa tipe balok laminasi kayu yang menggunakan baut dan kombinasi baut-perekat sebagai penghubung antar lapisan kayu. Balok dibedakan menjadi tipe A, B, dan C berdasarkan posisi penempatan baut dan perekat pada balok. Pengujian lentur dilakukan dengan metode *one point loading* menggunakan mesin Instron berkapasitas 5 ton. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan teori defleksi balok Euler-Bernoulli dan Timoshenko. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa persamaan balok Timoshenko cukup akurat untuk memprediksi perilaku elastik balok. Defleksi yang diperoleh dari eksperimen adalah sekitar dua kali lebih besar dari balok Euler-Bernoulli dan *error* tidak lebih dari 1% dari balok Timoshenko.

Kata kunci: balok laminasi, baut, pengujian lentur, perekat, perilaku elastik

Pendahuluan

Balok laminasi baut adalah balok yang terdiri lebih dari satu lapisan kayu yang membentuk suatu sistem laminasi dengan baut berfungsi sebagai transfer geser antar lapisan (Pranata *et al.* 2010, Pranata *et al.* 2011). Penggunaan baut sebagai penghubung antar lapisan kayu pada balok laminasi memungkinkan balok ini menjadi lebih mudah dan cepat dalam pembuatannya. Hal ini terutama sangat berguna ketika menghadapi

kondisi darurat setelah terjadi bencana. Kebanyakan infrastruktur sipil seperti jembatan mengalami rusak berat setelah terjadi gempa kuat misalnya, sehingga membutuhkan perbaikan dengan sangat segera karena fungsi dan keberadaannya sangat diperlukan untuk akses darurat bencana.

Kekakuan balok laminasi dapat melebihi kayu solid. Berbagai faktor seperti jenis kayu dan cara menghubungkan antar lapisan kayu akan mempengaruhi

kekuatan dan kekakuan balok laminasi. Penelitian terhadap berbagai jenis balok-kotak laminasi baut untuk jembatan (Gotou 2014) menyimpulkan bahwa, dalam beberapa kasus, kekakuan lentur balok dapat mencapai 50% lebih kecil dari nilai kekakuan yang diperoleh menggunakan teori Euler-Bernoulli. Hal ini sekitar 10% disebabkan oleh perlemahan titik hubung di area tarik balok (bagian bawah balok) dan selebihnya (sebagian besar) disebabkan oleh deformasi geser yang terjadi. Hal ini sesuai dengan teori Timoshenko yang memperhitungkan adanya pengaruh geser pada balok. Biasanya tegangan geser bernilai tinggi disekitar daerah sumbu netral balok sehingga memungkinkan deformasi geser yang besar di daerah ini. Dalam penelitian ini hasil pengujian dibandingkan dengan teori defleksi balok yang dikemukakan oleh Euler-Bernoulli dan Timoshenko. Penelitian ini bertujuan memahami perilaku elastik lentur beberapa tipe balok laminasi kayu yang menggunakan baut dan paku.

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan kayu mahoni berkadar air 13%. Perekat Epoxy demp-X dengan perbandingan 1:1 serta baut berdiameter 3 mm digunakan sebagai penghubung geser.

Total semua balok berjumlah 18 sampel uji. Balok dibagi menjadi 3 tipe, yaitu tipe A, B, dan C. Pembagian tipe tersebut dilakukan berdasarkan posisi penempatan baut dan perekat pada balok. Balok tipe A hanya menggunakan baut sebagai penghubung antar laipsan kayu penyusun balok. Baut ditempatkan di setiap jarak 5 cm disepanjang bentang balok. Sementara itu balok tipe B dan C menggunakan gabungan antara perekat dan baut. Baut pada balok tipe C ditempatkan disepanjang 30 cm di tengah bentang balok, dengan jarak yang sama dengan jarak baut pada balok tipe A, dan perekat digunakan di selain area tersebut, sedangkan pada balok tipe B baut ditempatkan di sepanjang area yang menggunakan perekat pada balok tipe C yaitu sepanjang 30 cm di kedua ujung balok, dan perekat ditempatkan di area yang menggunakan baut (sepanjang 30 cm di tengah bentang balok).

Balok terdiri atas 3 lapis lamina dengan ketebalan masing-masing lamina adalah 1,67 cm. Tabel 1 memperlihatkan pembagian sampel uji untuk masing-masing tipe balok. Semua balok diuji lentur menggunakan mesin Instron berkapasitas 5 ton. Pengujian dilakukan dengan metode pembebanan terpusat di tengah bentang dengan panjang bentang balok adalah 90 cm.

Tabel 1 Pembagian sampel uji balok kayu laminasi

No	Tipe	Penghubung	Diameter baut	Kode sampel	Jumlah
1	A	baut	3 cm	Exp1, Exp2, Exp3	3
2	B	baut, perekat	3 cm	Exp1, Exp2, Exp3	3
3	C	baut, perekat	3 cm	Exp1, Exp2, Exp3	3
Total					9

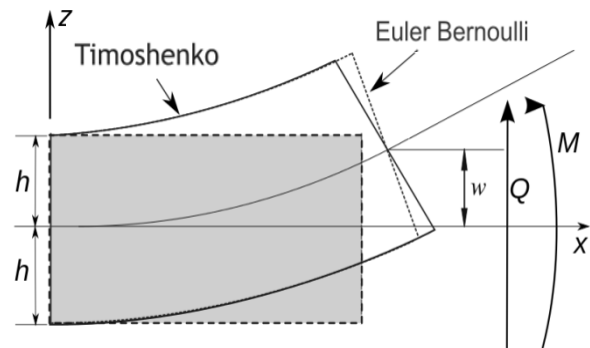
Hasil dan Pembahasan

Perbedaan mendasar antara teori balok Euler-Bernoulli dan Timoshenko dapat dijelaskan seperti pada Gambar 1. Teori balok Euler-Bernoulli mengabaikan adanya pengaruh deformasi geser pada penampang balok, yaitu dengan cara mengasumsikan bahwa bidang penampang tetap tegak lurus (tidak berubah) terhadap garis netral penampang balok selama terjadi lenturan. Hal ini menjadikan tegangan dan regangan geser tidak diperhitungkan dalam teorinya.

Namun berbeda dengan teori balok Timoshenko bahwa deformasi balok didasarkan pada deformasi geser. Disekitar daerah netral terjadi tegangan geser yang tinggi sehingga menyebabkan deformasi geser. Tegangan geser yang bekerja di satu sisi elemen selalu akan disertai tegangan geser yang besarnya sama dan bekerja tegak lurus muka elemen tersebut. Dengan asumsi bahwa tegangan geser yang bekerja disetiap elemen kecil pada penampang balok tersebut adalah vertikal, maka terjadi tegangan horizontal yang bekerja antara lapisan horizontal balok yang besarnya sama dengan tegangan geser vertikal tersebut. Tegangan geser maksimum (τ_{maks}) di balok dengan penampang persegi panjang adalah 50% lebih besar dari tegangan geser rata-rata V/A (Gere *et al.* 1997).

Hasil pengujian lentur dan nilai yang diperoleh secara teoritis balok laminasi baut tipe A diperlihatkan pada Gambar 2. Garis “EB” adalah grafik hubungan beban-defleksi yang diperoleh menggunakan teori deflesi balok yang dikemukakan oleh Euler-Bernoulli (persamaan 1) dan garis “Timo” adalah grafik beban-defleksi berdasarkan teori balok Timoshenko (persamaan 2),

sedangkan angka 1, 2, dan 3 menunjukkan nomor sampel balok. Sementara itu, defleksi balok laminasi yang diperoleh dari hasil pengujian lentur diperlihatkan oleh garis Exp1, Exp2, dan Exp3.



Gambar 1 Perbandingan deformasi balok Euler-Bernoulli dan balok Timoshenko.

Kedua persamaan ini (Persamaan 1 dan 2) ditentukan dengan melibatkan persamaan (3) untuk nilai koefisien geser k yang dipengaruhi oleh nilai rasio poisson ν material balok (Timoshenko 1972), persamaan (4), dan persamaan (5) (Cahyono *et al.* 2014). E_{app} adalah nilai Modulus Elastisitas yang diperoleh dengan hanya memperhitungkan defleksi akibat lentur, sedangkan E_{true} adalah Modulus Elastisitas akibat lentur dan geser. Kedua nilai ini memiliki perbedaan mencapai 13,4% untuk balok glulam kayu eukaliptus (Sulistyawati 2006). Substitusi persamaan (5) ke (4) menghasilkan persamaan hubungan antara modulus geser G dan E_{app} . Persamaan tersebut selanjutnya disubstitusi kembali ke persamaan (2). Nilai modulus geser G yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menentukan E_{app} dari hasil substitusi persamaan (5) dan (4).

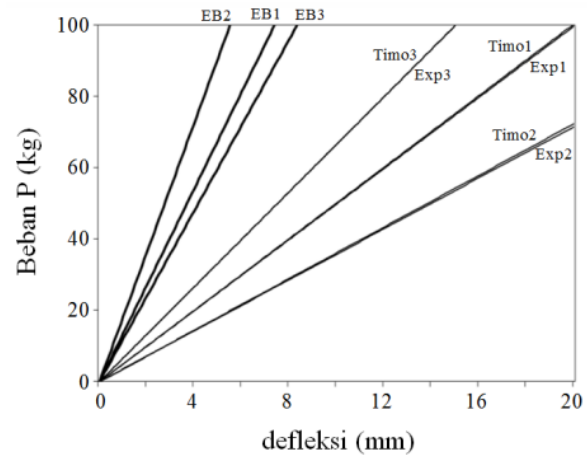
$$\delta = \frac{PL^3}{48E_{app}I} \quad \dots\dots (1)$$

$$\delta = \frac{PL^3}{48E_{app}I} + \frac{PL}{4kGA} \quad \dots\dots (2)$$

$$k = \frac{10(1+\nu)}{12+11\nu} \quad \dots\dots (3)$$

$$E_{true} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta\left(1-\frac{3PL}{10bhG\delta}\right)} \quad \dots\dots (4)$$

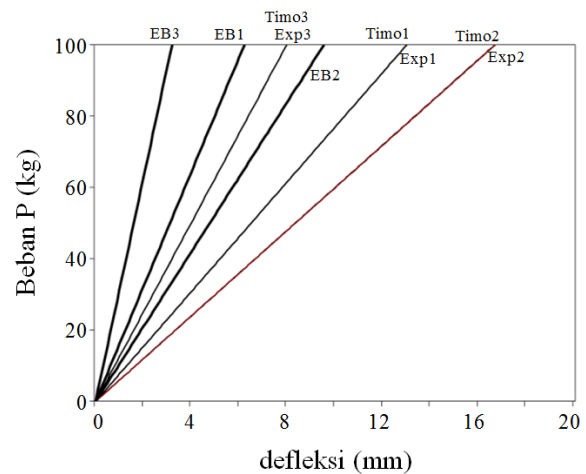
$$E_{true} = -829 + 1,04E_{app} \quad \dots\dots (5)$$



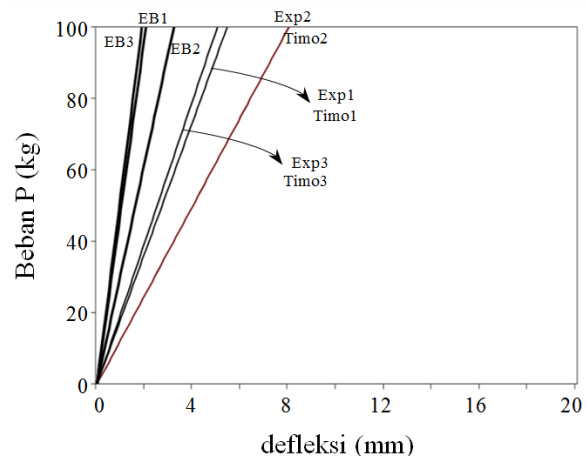
Gambar 2 Hubungan beban-defleksi balok tipe A.

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa kurva hasil pengujian lentur balok tipe A untuk semua ulangan berhimpit dengan kurva balok Timoshenko. Kondisi ini juga terjadi pada balok tipe B dan C (Gambar 3 dan 4). Perbedaan kedua kurva tersebut bahkan tidak melebihi 0.6%. Hasil pengujian terhadap 3 sample balok tipe A diperoleh bahwa sampel 1, 2, dan 3 berturut-turut adalah 2,72; 5,07; dan 1,08 kali lebih besar dari balok Euler-Bernoulli. *Error* balok tersebut terhadap balok Timoshenko masing-masing adalah 0,58; 1,11; dan 0,02%.

Dengan cara yang sama dengan balok laminasi tipe A, hasil pengujian lentur balok laminasi tipe B dan tipe C juga dibandingkan dengan teori defleksi balok Euler-Bernoulli dan Timoshenko. Perbandingan kurva beban-defleksi yang diperoleh kemudian diperlihatkan pada Gambar 3 dan 4. Defleksi balok laminasi dari pengujian lentur ditunjukkan oleh garis Exp1, Exp2, dan Exp3, sedangkan balok Euler-Bernoulli dan Timoshenko masing-masing disimbolkan sebagai “EB” dan “Timo”.



Gambar 3 Hubungan beban-defleksi balok tipe B.



Gambar 4 Hubungan beban-defleksi balok tipe C.

Pengujian terhadap 3 sample balok tipe B diperoleh bahwa sampel 1, 2, dan 3 berturut-turut adalah 2,09; 1,75; dan 2,50 kali lebih besar dari balok Euler-Bernoulli, sedangkan untuk balok tipe C masing-masing adalah 2,65; 2,50; dan 2,67 kali lebih besar dari balok Euler-Bernoulli. Sementara itu, *error* tiga balok tipe B dan C terhadap balok Timoshenko berturut-turut adalah 0, 0,12, 0,02%, dan 0,03, 0,06, 0,0%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata defleksi balok tipe A yang diperoleh dari pengujian lentur adalah 2,96 kali lebih besar dari defleksi balok Euler-Bernoulli, sedangkan balok tipe B dan C berturut-turut memiliki rata-rata defleksi 2,11 dan 2,61 kali lebih besar dari defleksi balok Euler-Bernoulli. Balok tipe A, B, dan C memiliki relatif *error* terhadap balok Timoshenko berturut-turut adalah sebesar 0,57, 0,05, dan 0,04%.

Selain mengindikasikan keakuratan persamaan (5) dalam mendefinisikan hubungan antara E_{app} dan E_{true} ($R^2 = 0,99$), nilai *error* yang sangat kecil ini juga menegaskan bahwa defleksi balok sangat mungkin didekati dengan persamaan Timoshenko. Sebagai perbandingan, nilai *error* terhadap balok Timoshenko untuk balok kotak kayu laminasi tegangan (*timber stress-laminated box-beam*) adalah sekitar 1% (Gotou 2014). Selain itu, Gambar 2, 3, dan 4 memperlihatkan kekakuan balok meningkat dari tipe A, B, dan C. Kekakuan terbesar pada balok tipe C mengindikasikan bahwa perekat berperan cukup signifikan dibandingkan dengan baut dalam menahan geser.

Kesimpulan

Penelitian ini membandingkan kekakuan 3 tipe (A, B, dan C) balok kayu laminasi

baut hasil pengujian lentur terhadap hasil perhitungan menggunakan teori defleksi balok Euler-Bernoulli dan Timoshenko. Defleksi yang diperoleh dari pengujian lentur adalah sekitar dua kali lebih besar dibandingkan dengan teori balok Euler-Bernoulli, sedangkan *error* tidak melebihi 1% terhadap balok Timoshenko. Hal ini mengindikasikan bahwa geser berpengaruh besar terhadap defleksi balok. Selain itu, persamaan balok Timoshenko cukup akurat untuk memprediksi perilaku elastik balok.

Daftar Pustaka

- Cahyono TD, Wahyudi I, Priadi T, Febrianto F, Ohorella S. 2014. Analisis modulus geser dan pengaruhnya terhadap kekakuan panel laminasi kayu samama (*Antocephallus Macrophyllus*). *J Teknik Sipil*. 21(2): 121-128.
- Gere JM, Stephen PT,. 1997. *Mechanics of Material*. New York: Publishing Company.
- Gotou H. 2014. Shear behavior of on-site timber stress-laminated box-beam bridges, *Proceeding World Conference on Timber Engineering WCTE*, 10-14 Agustus 2014. Quebec City, Canada.
- Pranata YA, Suryoatmono B, Tjondro JA. 2010. Flexural behavior of bolt-laminated beams: experimental and numerical analyses. *Proceeding 2nd International Conference Indonesian Wood Research Society*, 12-13 November 2010. Bali: Indonesian Wood Research Society.
- Pranata YA, Suryoatmono B, Tjondro, JA. 2011. The flexural rigidity ratio of indonesian timber bolt-laminated beam, Indonesia: *Proceeding The 3rd European Asian Civil Engineering*

- Forum*. 20-22 September 2011.
Yogyakarta: Universitas Atma Jaya.
- Timoshenko S, Gere JM. 1972.
Mechanics of Materials. New York:
Van Nostrand Reinhold Co.
- Sulistyawati I. 2006. ratio of shear to
bending deflection and its influence to
bending stiffness (EI) of timber beam,
J Trop Wood Sci Technol. 4(2):44-49.
- Riwayat naskah:
Naskah masuk (*received*): 16 September 2014
Diterima (*accepted*): 12 Nopember 2014