

PERBANDINGAN PERILAKU LENTUR BALOK BAMBU MENGUNAKAN SIFAT MEKANIK YANG DIPEROLEH DENGAN METODE RATA-RATA DAN PERSENTIL KE-5

Comparison of Bamboo Beam Behavior using Mechanical Properties Obtained from Average and 5th Percentile Method

Inggar Septhia Irawati, Urwatul Wusqo

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada,
Jalan Grafika 2 Yogyakarta, Indonesia

Surel: inggar_septhia@ugm.ac.id, urwatul.wusqo@mail.ugm.ac.id

Diterima: 26 Februari 2020; Disetujui: 29 April 2020

Abstrak

Penggunaan bambu sebagai material konstruksi semakin meningkat seiring dengan isu lingkungan yang semakin banyak dibahas. Namun demikian, tidak ada regulasi yang secara spesifik mengatur tentang desain konstruksi bambu di Indonesia. Penentuan sifat mekanik bambu di Indonesia kebanyakan masih diambil dari rata-rata hasil pengujian di laboratorium, sementara ISO 22156 mengatur penggunaan nilai persentil kelima dari hasil pengujian. Oleh karena itu, studi komparasi perilaku bambu yang nilai sifat mekanik dihitung menggunakan metode rata-rata dan persentil ke-5 hasil pengujian sangat penting untuk dilakukan karena akan meningkatkan perhatian dan pemahaman para perencana untuk menggunakan sifat mekanik dari persentil ke-5 hasil pengujian dalam perencanaan struktur bambu. Makalah ini menyajikan hasil studi komparasi perilaku lentur balok bambu yang sifat mekanik lenturnya, meliputi modulus elastisitas lentur dan modulus patah, dihitung menggunakan 3 metode yaitu metode rata-rata, metode persentil ke-5 ISO 22156, dan metode persentil ke-5 hubungan antara modulus elastisitas dan modulus lentur. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan modulus elastisitas dan modulus patah bambu yang didapatkan dari metode rata-rata hasil pengujian laboratorium memberikan nilai kapasitas beban, baik pada beban maksimum maupun beban pada kondisi lendutan ijin, yang lebih tinggi dibandingkan data beban pada kedua kondisi yang diperoleh dari hasil pengujian lentur statik. Hal ini akan meningkatkan probabilitas terjadinya kegagalan pada struktur bambu. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa persyaratan kekakuan adalah faktor yang lebih menentukan pada perencanaan struktur balok bambu. Penggunaan nilai modulus elastisitas dan modulus patah yang diperoleh dari metode ISO 22156 lebih direkomendasikan.

Kata Kunci: Perilaku lentur bambu, modulus elastisitas lentur, modulus patah, metode rata-rata, metode persentil ke-5

Abstract

*The use of bamboo as a structural element was increased as the environmental issues became an important topic worldwide. However, in Indonesia, there was no specific standard design of bamboo structure. The determination of the mechanical properties of bamboo mostly based on the average of the laboratory test result whereas ISO 22156 recommend using the 5th percentile of the bamboo bending test results. Hence, a comparative study of bamboo structural behavior calculated by using mechanical properties derived from those different methods is crucial to increase the engineer's awareness to apply the 5th percentile values of the laboratory test result as the bending properties. This paper presents the result of the comparative study on the *Gigantochloa atroviolacea* bamboo beam flexural behavior regarding the bamboo bending properties determined by three different methods i.e. the average method, the 5th percentile in accordance with ISO 22156 method, and the 5th percentile method based on modulus of elasticity - modulus of rupture correlation. The result shows that the use of the bending properties derived from the average method of the laboratory test yield the higher numerically load capacity compared to experimentally load capacity when either the bending failure or the maximum deflection occurred. Thus, it increases the probability of the structural failure on the bamboo structure. However, the most decisive factor in the bamboo beam design is the stiffness requirements. In this case, the use of bending properties resulted from ISO 22156 method is recommended.*

Keywords: Bamboo bending behaviour, modulus of elasticity, modulus of rupture, average method, 5th percentile method

PENDAHULUAN

Bambu merupakan material alami yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan di berbagai bidang kehidupan. Bambu dapat digunakan sebagai material penyusun panel bambu, bahan tekstil, bioenergi, arang, karbon aktif, lantai, kerajinan, dan mebel (Gupta dan Kumar 2008). Hal ini menunjukkan bahwa bambu memiliki banyak keunggulan.

Bambu merupakan material yang ramah lingkungan dan memiliki peran penting dalam proses penyerapan karbon dunia (Sohel et al. 2015). Bambu merupakan tanaman cepat tumbuh yang dapat dipanen pada usia 3-5 tahun. Hingga saat ini diketahui bahwa terdapat 1400 jenis bambu di seluruh dunia (Hebel et al. 2016). Material bambu juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya, sifatnya yang menyerap air, perilaku kembang-susut, durabilitas yang rendah, serta rentan terhadap serangan jamur dan serangga (Kim et al. 2011; Hebel et al. 2016). Meskipun demikian, beberapa metode pengawetan bambu (baik dengan cara tradisional maupun menggunakan bahan kimia) dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan bambu terhadap serangan jamur dan serangga (Liese 2004; Singha dan Borah 2017).

Dalam bidang teknik sipil, penggunaan bambu sebagai elemen struktural baik dalam bentuk bambu utuh maupun bambu rekayasa dapat ditemui sebagai *scaffolding*, balok, kolom, dan lantai (Dey dan Chetia 2018). Bambu juga dapat digunakan sebagai material untuk *geogrid*, rumah, dan jembatan pejalan kaki (Wu 2014; Majid 2015; Muhsin, Febriany, dan Hidayati 2015; Nurdiah 2016; Paraskeva, Grigoropoulos, dan Dimitrakopoulos 2017; Ye dan Fu 2018). Penggunaan material bambu sebagai material konstruksi yang ramah lingkungan semakin meningkat seiring dengan semakin banyaknya permasalahan lingkungan yang menjadi isu penting dunia. Selain itu, hasil penelitian yang menyebutkan bahwa sifat mekanik bambu mendekati sifat mekanik kayu keras (Huang, Sun, dan Musso 2017) semakin memperluas penggunaan bambu dalam bidang konstruksi sebagai alternatif material pengganti kayu.

Di Indonesia, bambu juga banyak digunakan sebagai bahan konstruksi (Nurdiah 2016). Dalam proses perencanaan balok bambu, bambu diasumsikan sebagai material isotropis dan elastik linear. Langkah awal yang sangat penting untuk dilakukan dalam perencanaan adalah menentukan sifat mekanik lentur bambu, yaitu modulus elastis (*Modulus of Elasticity, MOE*) dan modulus patah (*Modulus of Rupture, MOR*). ISO 22156 telah mengatur prosedur untuk menentukan sifat mekanik lentur bambu untuk perencanaan balok bambu, yaitu sifat mekanik lentur

diambil dari persentil ke-5 hasil uji lentur bambu (Sari 2015; Paraskeva, Grigoropoulos, dan Dimitrakopoulos 2017). Namun, di Indonesia umumnya perencana menggunakan nilai sifat mekanik lentur bambu yang diperoleh dari rata-rata hasil uji lentur, bukan dari metode persentil ke-5 (Patmasari 2006; Nugroho 2008; Putra 2008; Asmoro 2014; Wulandari 2015; Prihadi dan Pratama 2016; Mulia 2016; Majid 2015; Sari 2015). Hal ini disebabkan oleh peraturan tentang tata cara perencanaan struktur bambu secara spesifik belum tersedia di Indonesia. Untuk meningkatkan pemahaman dan perhatian perencana Indonesia dalam penerapan nilai persentil ke-5 pada hasil pengujian lentur statik untuk memperoleh *MOE* dan *MOR*, informasi hasil penelitian tentang perbandingan perilaku lentur balok bambu yang diperoleh dengan menggunakan sifat mekanik lentur bambu *MOE* dan *MOR* dari dua metode yang berbeda (metode rata-rata dan metode persentil ke-5) sangat diperlukan. Namun penelitian tentang perbandingan perilaku lentur tersebut belum pernah dilakukan (Janseen 2000; Kaminski, Laurence, dan Trujillo 2016; Kaminski et al. 2016). Oleh karena itu, perbandingan perilaku lentur balok bambu dengan mempertimbangkan *MOE* dan *MOR* yang didapatkan dari metode rata-rata dan metode persentil data ke-5 telah dilakukan dan hasilnya disampaikan dalam naskah publikasi ini.

Berdasarkan hasil kajian pustaka, penentuan sifat mekanik lentur (*MOE* dan *MOR*) bambu dengan metode rata-rata dan metode persentil ke-5 dapat dijabarkan lagi menjadi tiga metode, yaitu metode rata-rata (Howell 2011), metode persentil ke-5 berdasarkan ISO 22156 (Technical Committee ISO/TC 165 2004), dan metode persentil ke-5 dengan berdasarkan hubungan *MOE-MOR* (El-Osta, Badran, dan El-Wakeel 1979; Baillères, Hopwell, dan Boughton 2009; Baillères et al. 2012; Baar, Tippner, dan Rademacher 2015). Dalam penelitian ini, ketiga metode tersebut digunakan untuk menentukan nilai *MOE* dan *MOR*. Kemudian, analisis numerik balok bambu menggunakan input data *MOE* dan *MOR* yang didapatkan dari ketiga metode dilakukan. Hasil analisis numerik selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengujian lentur statik laboratorium untuk mengetahui perbedaan tingkat keamanan (kekuatan) dan kenyamanan (kekakuan) dari struktur balok bambu yang dirancang.

METODE

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data sekunder pengujian lentur statik hasil penelitian yang dilakukan oleh Lubis (Lubis 2019). Analisis *studentized residual* dilakukan untuk menghilangkan

data pencilan dalam menentukan nilai *MOE* dan *MOR*. Meskipun dalam ISO 22156 tidak disebutkan ketentuan untuk menghilangkan data pencilan, namun data ini perlu dihilangkan karena dapat mempengaruhi nilai sifat mekanik yang didapatkan. Kemudian, nilai *MOE* dan *MOR* bambu ditentukan melalui tiga (3) metode yang berbeda, yaitu:

1. metode rata-rata,
2. metode persentil ke-5 sesuai dengan ISO 22156 (selanjutnya disebut dengan metode ISO 22156),
3. metode persentil ke-5 mempertimbangkan hubungan antara nilai *MOE-MOR* (selanjutnya disebut dengan metode hubungan *MOE-MOR*).

Ketiga nilai *MOE* dan *MOR* yang didapatkan dari tiga metode tersebut selanjutnya digunakan sebagai input data untuk melakukan analisis numerik. Oleh karena itu, terdapat tiga analisis numerik yang dikerjakan secara terpisah, yaitu analisis numerik yang dilakukan dengan menggunakan data *MOE* dan *MOR* hasil metode rata-rata, metode ISO 22156 dan metode hubungan *MOE-MOR*. Ketiga analisis numerik menggunakan dimensi geometrik bambu yang sama. Hasil analisis numerik kemudian dievaluasi untuk mengetahui tingkat keamanan dan kenyamanan struktur balok bambu.

Data Sekunder Hasil Uji Lentur

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, hasil pengujian lentur statik yang dilakukan oleh Lubis (2019) digunakan dalam penelitian ini. Bambu yang digunakan adalah Bambu Wulung (*Gigantochloa atrovioleacea*), berusia 3 - 5 tahun, dan berasal dari daerah Seyegan, Sleman. Pada pengujian tersebut, terdapat 20 sampel balok bambu yang diuji, yang diberi nama 1W hingga 20W. Sampel pengujian bambu diawetkan menggunakan larutan boraks dengan konsentrasi 5% dengan metode *Vertical Soak Diffusion* (VSD) atau yang biasa dikenal dengan metode pengawetan gravitasi. Proses pengawetan dilakukan dalam 15 hari (Lubis 2019).

Lubis (2019) melakukan pengujian lentur *three point bending test*, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 1. Diameter sampel bambu yang digunakan berkisar antara 60 mm sampai 90 mm. Ketebalan bambu berkisar antara 5 mm hingga 15 mm. Panjang balok bambu yang digunakan melebihi 30*D*, di mana *D* merupakan diameter luar bambu.

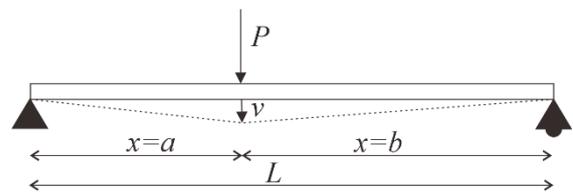
Dalam penelitian ini, nilai *MOE* dan *MOR* yang diperoleh dari hasil penelitian Lubis (2019) dengan menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2) kemudian diolah menggunakan metode rata-rata, metode ISO 22156 dan metode hubungan *MOE-MOR* untuk mendapatkan sifat mekanik lentur bambu *MOE* dan *MOR* yang digunakan untuk perencanaan. Kurva beban-defleksi hasil pengujian Lubis (2019)

digunakan untuk menjustifikasi tingkat keamanan dan kenyamanan struktur balok bambu.

$$MOE = \frac{1}{Iv} \frac{Pba^3}{6L} - \frac{Pb(L^2-b^2)a}{6L} \dots\dots\dots(1)$$

$$MOR = \frac{My}{I} \dots\dots\dots(2)$$

Pada Persamaan (1) dan (2), *P* menunjukkan nilai beban, *L* merupakan panjang bentang, *v* adalah defleksi, *I* adalah momen inersia penampang, *M* adalah nilai momen lentur bambu, dan *y* adalah tinggi garis netral yang bernilai sebesar setengah dari diameter bambu. Nilai *a* dan *b* merupakan jarak beban terhadap tumpuan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Set-up Pengujian *Three Point Bending*
 Sumber : Lubis-2019, dengan modifikasi

Penentuan Nilai Sifat Mekanik Lentur Bambu

Rata-rata dari hasil uji lentur

Sifat mekanik lentur bambu umumnya diperoleh dengan metode rata-rata hasil pengujian lentur. Jika terdapat sejumlah *n* data, misalnya *x*₁, *x*₂, *x*₃, ... *x*_{*n*}, maka, nilai rata-rata data ini dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3).

$$m = \frac{\sum x}{n} \dots\dots\dots(3)$$

ISO 22156

Menurut ISO 22156, nilai karakteristik bambu, *R_k*, yang mewakili sifat material bambu dapat dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$R_k = R_{0,05} \left(1 - \frac{2.7 \frac{s}{m}}{\sqrt{n}}\right) \dots\dots\dots(4)$$

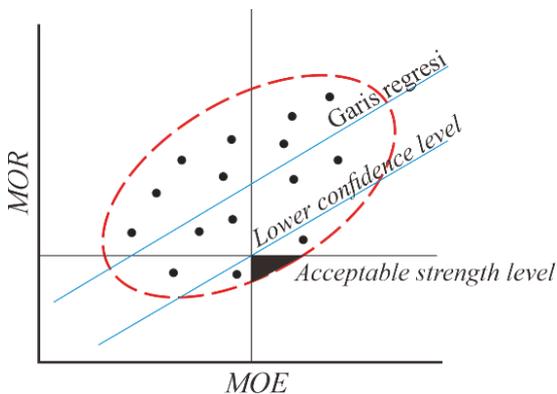
Pada Persamaan (3), *R*_{0,5} adalah nilai persentil ke-5 dari hasil pengujian, *m* adalah nilai rata-rata hasil pengujian, dan *s* adalah standar deviasi. Nilai karakteristik sendiri merupakan nilai persentil ke-5 dengan selang kepercayaan 75% yang mempresentasikan populasi (Technical Committee ISO/TC 165 2004). Nilai persentil ke-5 hasil pengujian dapat dicari menggunakan Persamaan (5).

$$R_{0,05} = \text{Data ke } - \frac{5(n+1)}{100} \dots\dots\dots(5)$$

Hubungan antara MOE dan MOR

Secara umum, sifat mekanik lentur *MOE* dan *MOR* dapat dihitung secara terpisah tanpa mempertimbangkan hubungan antar masing-masing variabel seperti yang dijelaskan pada sub-sub bab sebelumnya. Namun, beberapa penelitian kayu dan bambu menunjukkan bahwa terdapat korelasi antara nilai *MOE* dan *MOR*. Beberapa hasil penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa nilai koefisien korelasi, *r*, yang menunjukkan hubungan antara nilai *MOE* dan *MOR* berkisar antara 0,237-0,925 (El-Osta, Badran, dan El-Wakeel 1979; Baillères, Hopwell, dan Boughton 2009; Baillères et al. 2012; Baar, Tippner, dan Rademacher 2015). Menurut teori statistik, nilai *r* bervariasi dari -1 hingga 1, dimana dua buah variabel dikatakan memiliki korelasi yang positif jika $r = 1$, dan memiliki korelasi negatif jika $r = -1$, serta saling tidak memiliki hubungan satu sama lain jika nilai *r* sama dengan atau mendekati 0 (Howell 2011).

Dalam Wood Handbook (Forest Products Laboratory - USDA 2010), disebutkan bahwa *acceptable level strength* dari material kayu dapat ditentukan dengan membuat *lower confidence line* dengan selang kepercayaan 95%. Analisis statistik perlu dilakukan terlebih dahulu agar *acceptable level strength* dapat diperoleh. Data hasil pengujian laboratorium disajikan dalam bentuk diagram *scatterplot*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, untuk mengetahui hubungan antara nilai *MOE* dan *MOR*. Sumbu *x* menunjukkan nilai *MOE*, sedangkan sumbu *y* menunjukkan nilai *MOR*. Selanjutnya, dibuat persamaan garis regresi linier menggunakan Persamaan (6) sampai (9).



Gambar 2 Hubungan antara *MOE* dan *MOR*
 Sumber: Forest Laboratory Product-2010, dengan modifikasi

$$r = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}}\sqrt{s_{yy}}} \dots\dots\dots (6)$$

$$s_{xy} = \Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y}) \dots\dots\dots (7)$$

$$s_{xx} = \Sigma(x - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$s_{yy} = \Sigma(y - \bar{y})^2 \dots\dots\dots (9)$$

Dalam Persamaan (6), *r* adalah koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan antar variabel. Persamaan garis regresi dapat didefinisikan menggunakan Persamaan (10), dengan β_1 adalah kemiringan garis, dan β_0 adalah perpotongan antara garis regresi dan sumbu *y*. Nilai β_1 dan β_0 dapat dihitung menggunakan Persamaan (11) dan (12).

$$y = \beta_0 + \beta_1x \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta_1 = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1x \dots\dots\dots (12)$$

Persamaan untuk *lower confidence line* dapat dihitung menggunakan Persamaan (13) sampai (15). $\bar{\beta}_0$ merupakan perpotongan antara garis batas bawah dengan sumbu *y*, yang mana nilainya dapat dihitung menggunakan Persamaan (14). Nilai *t* pada Persamaan (14) adalah nilai *t* kritis distribusi *t*, nilai *s_e* pada Persamaan (15) merupakan nilai *standard error of estimate*, dan nilai *k* pada Persamaan (16) menunjukkan jumlah orde polinomial dari sejumlah data *n* yang digunakan.

$$y = \bar{\beta}_0 + \beta_1x \dots\dots\dots (13)$$

$$\bar{\beta}_0 = \beta_0 \pm t \cdot s_e \dots\dots\dots (14)$$

$$s_e = s_{YX} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{s_{xx}}} \dots\dots\dots (15)$$

$$s_{YX} = \sqrt{\frac{\Sigma Y^2 - \beta_0 \Sigma Y - \beta_1 \Sigma XY}{n - k - 1}} \dots\dots\dots (16)$$

Persamaan *lower confidence line* yang didapatkan kemudian digunakan untuk mencari nilai *MOR* dengan memasukkan nilai *MOE* yang didapatkan dari nilai persentil ke-5 dari pengujian lentur di laboratorium.

Analisis Numerik

Analisis numerik struktur balok bambu dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000. Dalam penelitian ini, material bambu diasumsikan sebagai bahan yang berperilaku linier dan isotropik. Beberapa parameter input data untuk analisis numerik seperti *MOE* dan *MOR* diperoleh dari hasil analisis data menggunakan 3 metode seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Balok bambu dimodelkan sebagai elemen balok 1D yang memiliki penampang berongga, dengan diameter luar sebesar 78,43 mm dan ketebalan

sebesar 10,57 mm. Panjang balok bambu total adalah 2502,5 mm. Semua parameter geometrik diperoleh dari data rata-rata yang diukur oleh Lubis (2019). Balok bambu diberikan tumpuan sederhana pada ujung-ujungnya, yaitu berupa sendi dan rol. Balok bambu diberi beban terpusat yang terletak di 0,48L atau pada lokasi 1189,64 mm dari salah satu tumpuan. Beban ini diterapkan secara bertahap pada balok bambu dengan kenaikan beban sebesar 0,5 kN hingga mencapai kapasitas maksimumnya. Model analisis numerik dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Skema Pemodelan dalam SAP 2000

Kapasitas maksimum dari balok bambu dapat dihitung menggunakan Persamaan (17) dan (18). MOR_b adalah MOR bambu hasil analisis dengan metode rata-rata, metode ISO 22156 dan metode hubungan $MOE-MOR$. Secara tipikal, MOE bambu hasil analisis dengan metode rata-rata, metode ISO 22156 dan metode hubungan $MOE-MOR$ diberi notasi MOE_b .

Dengan diketahuinya nilai MOR bambu, maka kapasitas momen lentur balok bambu M_{max} dapat dihitung menggunakan Persamaan (17). Selanjutnya, untuk mengetahui kapasitas beban maksimum P_{max} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, Persamaan (18) dapat digunakan. I_y adalah momen inersia terhadap sumbu y dan y_b adalah jarak garis netral yang diukur dari serat terluar balok bambu.

$$M_{max} = \frac{MOR_b I_y}{y_b} \dots\dots\dots (17)$$

$$P_{max} = \frac{M_{max}(a+b)}{a.b} \dots\dots\dots (18)$$

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, dalam penelitian ini dibuat 3 jenis model numerik yang dibedakan atas sifat mekaniknya. Perbedaan ketiga jenis model ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Jenis Pemodelan

Jenis	Metode perolehan sifat mekanik lentur
Model A	Metode rata-rata
Model B	ISO 22156
Model C	Hubungan antara MOE and MOR

Pada model pertama (model A), MOE dan MOR bambu yang digunakan berasal dari metode rata-rata hasil uji lentur. Pada model kedua (model B), MOE dan MOR

bambu yang digunakan ditentukan menggunakan persamaan yang ada pada ISO 22156. Pada model ketiga (model C), MOE dan MOR bambu yang digunakan dihitung dengan metode hubungan $MOE-MOR$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Mekanik Lentur Bambu

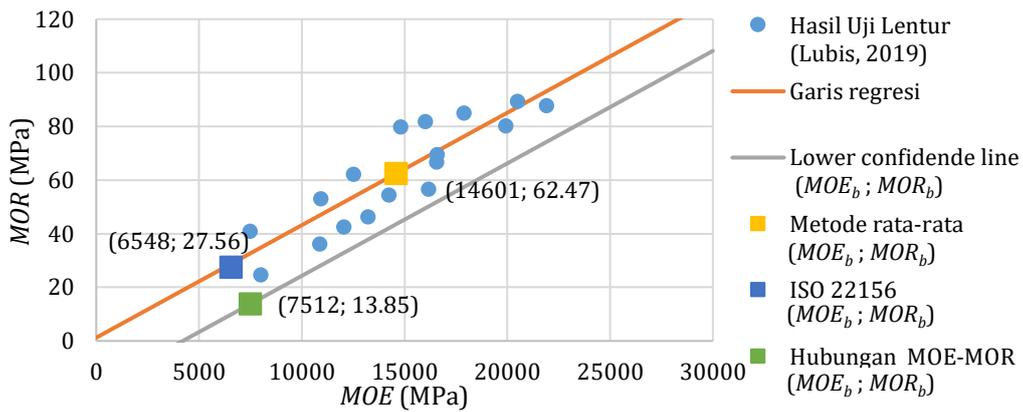
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, sifat mekanik lentur bambu dalam penelitian ini dihitung dengan tiga metode yang berbeda (metode rata-rata, metode ISO 22156, metode hubungan $MOE-MOR$). Tabel 2 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa MOE_b dan MOR_b yang diperoleh dari metode rata-rata hasil pengujian laboratorium lentur statik memberikan nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan dua metode lainnya. Lebih detil, MOE_b yang didapatkan dari metode rata-rata, masing-masing, lebih tinggi 223% dan 194% dibandingkan dengan MOE_b yang dihitung dengan menggunakan metode ISO 22156 dan metode hubungan $MOE-MOR$. Selanjutnya, MOR_b yang didapatkan dari metode rata-rata masing-masing juga bernilai 227% dan 451% lebih tinggi dibandingkan MOR_b yang dihitung menggunakan metode ISO 22156 dan hubungan $MOE-MOR$. Hal ini sangat wajar, karena MOE_b dan MOR_b yang diperoleh menggunakan metode ISO 22156 dan hubungan $MOE-MOR$ diambil dari nilai persentil ke-5 uji lentur statik bambu. Dapat dikatakan bahwa dengan persentil ke-5 maka hanya 5% dari hasil pengujian lentur berada di bawah nilai yang dihasilkan.

Tabel 2 Sifat Mekanik Lentur Bambu

Properti Lentur	Metode rata-rata	ISO 22156	Hubungan antara $MOE-MOR$
MOE_b (MPa)	14601	6548	7512
MOR_b (MPa)	62,47	27,56	13,85

Penentuan sifat mekanik lentur bambu berdasarkan ISO 22156 mempertimbangkan selang kepercayaan sebesar 75%, sedangkan pada metode hubungan $MOR-MOE$ digunakan selang kepercayaan sebesar 95%. Penggunaan selang kepercayaan yang cukup tinggi ini mengakibatkan nilai MOE_b dan MOR_b yang dihasilkan dari metode ISO 22156 dan metode hubungan $MOE-MOR$ lebih konservatif dibandingkan dengan metode rata-rata.

Perhitungan menggunakan Persamaan (4) berdasarkan metode ISO 22156 menghasilkan nilai MOE_b dan MOR_b masing-masing sebesar 6548 MPa dan 27,56 MPa. Nilai MOE_b dan MOR_b yang dihitung dari persentil ke-5 hasil pengujian lentur dengan



Gambar 4 Sifat Mekanik Lentur dari Bambu Wulung

mempertimbangkan hubungan antara $MOE-MOR$ adalah 7512 MPa dan 13,85 MPa. MOE_b yang diperoleh dari metode ISO 22156 lebih rendah dari MOE_b yang diperoleh dari metode hubungan antara $MOE-MOR$. Namun, hal ini berlaku kebalikan untuk nilai MOR_b . Perbedaan sifat mekanik lentur yang dihitung berdasarkan ISO 22156 dan hubungan $MOE-MOR$ dapat dilihat pada Tabel 3. Rasio MOE_b dan MOR_b yang dihitung berdasarkan ISO 22156 terhadap MOE_b dan MOR_b yang dihitung berdasarkan hubungan $MOE-MOR$ masing-masing adalah 0,87 dan 1,98.

Tabel 3 Perbandingan Properti Lentur Bambu dari Metode ISO 22156 dan Hubungan $MOE - MOR$

Properti lentur	ISO 22156	Hubungan $MOE-MOR$	Rasio
MOE_b (MPa)	6548	7512	0,87
MOR_b (MPa)	27,56	13,85	1,98

Kapasitas Lentur Balok Bambu

Kapasitas lentur dari balok bambu dihitung menggunakan Persamaan (17) sehingga kapasitas beban maksimum yang dapat ditahan diperoleh. Hasil perhitungan kapasitas beban maksimum dapat dilihat dalam Tabel 4. Kapasitas beban maksimum yang diperoleh dari hasil perhitungan dengan menggunakan metode rata-rata, ISO 22156, dan hubungan $MOE-MOR$ adalah 3390 N, 1496 N, dan 752 N. Rasio kapasitas beban maksimum yang dihitung dengan menggunakan MOR_b berasal dari metode rata-rata (P_A) terhadap kapasitas beban maksimum yang dihitung menggunakan MOR_b berasal dari metode ISO 22156 (P_B) adalah 2,27. Rasio kapasitas beban maksimum yang dihitung dengan menggunakan MOR_b berasal dari metode rata-rata (P_A) terhadap kapasitas beban maksimum yang dihitung dengan menggunakan MOR_b berasal dari metode hubungan $MOE-MOR$ (P_C) adalah 4,51. Nilai-nilai ini secara tidak langsung mencerminkan faktor keamanan struktur balok bambu. Berdasarkan Tabel 4, dapat dilihat bahwa penggunaan sifat mekanik lentur MOR_b yang diperoleh berdasarkan hubungan

$MOE-MOR$ untuk mendesain balok bambu memberikan faktor keamanan terbesar.

Tabel 4 Beban Maksimum Balok Bambu Wulung

	Metode rata-rata	ISO 22156	Hubungan antara $MOE-MOR$
P (N)	3390	1496	752
P_A/P	1,00	2,27	4,51

Berdasarkan Tabel 4, juga dapat diketahui bahwa P_B bernilai 98,94% lebih tinggi dari nilai P_C walaupun keduanya menggunakan nilai MOR_b yang diperoleh dari persentil ke-5. Perbedaan nilai P_B dan P_C yang mencapai 98,94% disebabkan karena perbedaan selang kepercayaan yang digunakan. MOR_b yang digunakan untuk menghitung P_B diperoleh dari metode ISO 22156 dengan selang kepercayaan 75% sedangkan MOR_b yang digunakan untuk menghitung P_C diperoleh dari metode hubungan $MOE-MOR$ dengan selang kepercayaan 95%. Semakin tinggi selang kepercayaan yang digunakan maka semakin tinggi faktor amannya.

Kurva Beban-Lendutan

Perbandingan kurva beban-lendutan Model A yang dihasilkan dari analisis numeris menggunakan SAP2000 terhadap kurva beban-lendutan hasil pengujian lentur yang dilaksanakan di laboratorium oleh Lubis (2019) dapat dilihat pada Gambar 5. Pola yang dihasilkan oleh kurva beban-lendutan Model A terletak di tengah-tengah data yang diperoleh dari hasil pengujian lentur laboratorium. Hal ini disebabkan oleh input data MOE_b dan MOR_b yang ditetapkan untuk model A merupakan MOE dan MOR rata-rata dari hasil pengujian lentur. Selanjutnya, beban maksimum dari masing-masing sampel uji lentur hasil pengujian lentur statis di laboratorium yang dilakukan oleh Lubis (2019) dapat dilihat pada Tabel 5. Seperti dijelaskan sebelumnya, nilai kapasitas beban maksimum yang dihitung berdasarkan MOR_b dari metode rata-rata, P_A , adalah

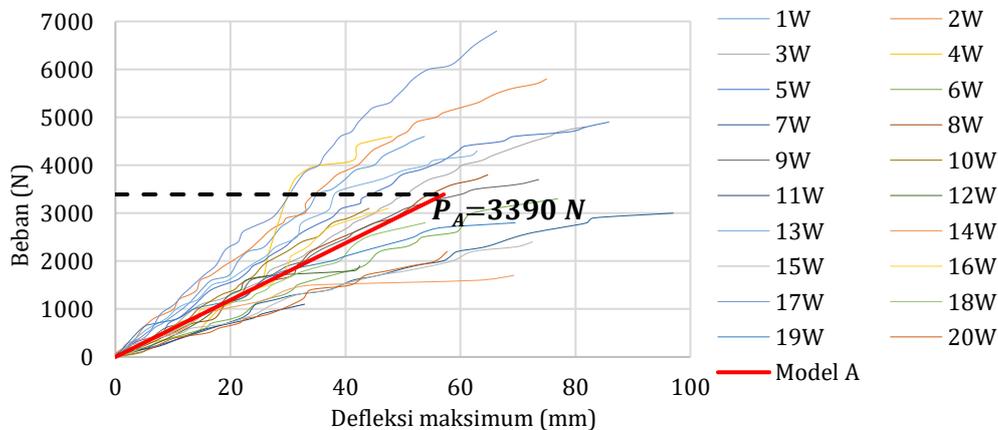
sebesar 3390 N. Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 5, dapat diketahui bahwa 11 dari 20 sampel bambu mengalami kegagalan sebelum beban lateral yang bekerja mencapai P_A . 11 sampel yang mengalami kegagalan tersebut adalah sampel dengan kode 6W, 7W, 10W, 11W, 12W, 14W, 15W, 16W, 18W, 19W, dan 20W.

Gambar 6 menunjukkan perbandingan kurva beban-lendutan antara hasil analisis numerik Model B dan hasil pengujian lentur statik. Nilai kapasitas beban maksimum yang dihitung berdasarkan MOR_b yang didapatkan dari ISO 22156, P_B , adalah sebesar 1496 N. Gambar 6 dan Tabel 5 menunjukkan bahwa hanya ada 1 dari 20 sampel bambu yang mengalami kegagalan sebelum beban mencapai P_B , yaitu sampel 11W.

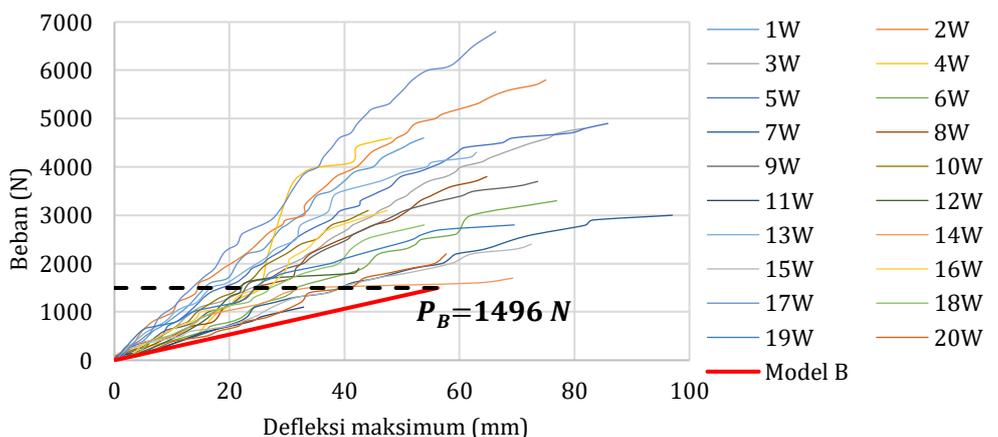
Gambar 7 menunjukkan perbandingan kurva beban-lendutan antara hasil analisis numeris Model C dan pengujian lentur statik di laboratorium. Besarnya

beban maksimum yang dihitung berdasarkan MOR_b yang diperoleh dengan menggunakan metode hubungan $MOE-MOR$, P_C , adalah sebesar 752 N. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5, tidak ditemukan sampel bambu yang mengalami kegagalan sebelum mencapai P_C .

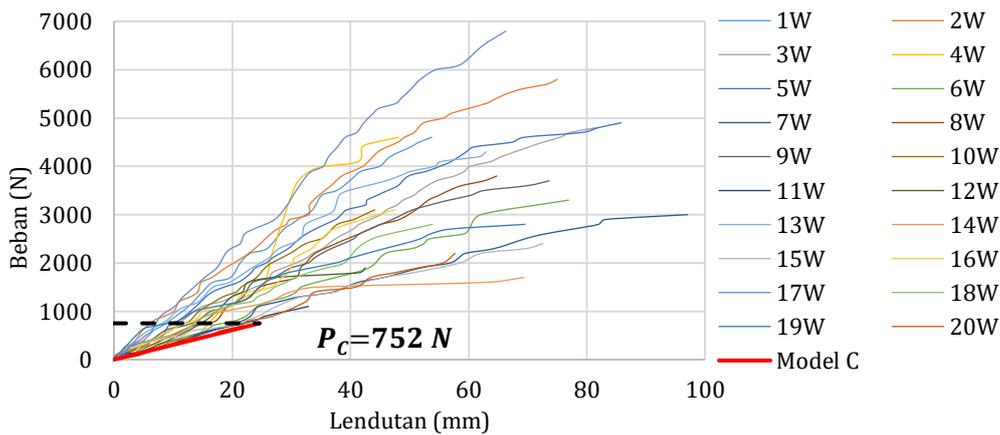
Berdasarkan hasil perbandingan antara kurva beban-lendutan yang diperoleh dari hasil pengujian lentur dan kurva beban-lendutan yang diperoleh dari hasil analisis numerik (Gambar 5 sampai Gambar 7), jumlah sampel balok bambu yang gagal sebelum mencapai kapasitas beban maksimum dari Model A jauh lebih banyak daripada Model B dan C. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah balok bambu yang mengalami kegagalan sebelum kapasitas beban maksimum rencana tercapai sangat berkaitan dengan persentil dan selang kepercayaan yang digunakan untuk memprediksi sifat mekanik lentur bambu MOR_b .



Gambar 5 Perbandingan Antara Hasil Analisis Numerik Model A dengan Hasil Pengujian



Gambar 6 Perbandingan Antara Hasil Analisis Numerik Model B dengan Hasil Pengujian



Gambar 7 Perbandingan Antara Hasil Analisis Numerik Model C dengan Hasil Pengujian

Tabel 5 Hasil Pengujian Lentur (Lubis, 2019)

Sampel	Diameter sampel (mm)	$P_{max}(N)$	Keterangan	Sampel	Diameter sampel (mm)	$P_{max}(N)$	Keterangan
1W	78,28	4600	-	11W	69,68	1100	kurang dari P_A dan P_B
2W	88,13	5800	-	12W	78,53	1900	kurang dari P_A
3W	78,95	4800	-	13W	79,85	4300	-
4W	83,80	4600	-	14W	63,48	1700	kurang dari P_A
5W	90,20	4900	-	15W	66,43	2500	kurang dari P_A
6W	85,43	3300	kurang dari P_A	16W	83,53	3100	kurang dari P_A
7W	72,18	3000	kurang dari P_A	17W	75,93	6800	-
8W	83,08	3800	-	18W	87,75	2800	kurang dari P_A
9W	80,33	3700	-	19W	72,15	2800	kurang dari P_A
10W	78,05	3100	kurang dari P_A	20W	72,90	2200	kurang dari P_A

Nilai rata-rata MOR_b yang digunakan untuk Model A mendekati nilai persentil ke-50 data pengujian lentur rata-rata. Akibatnya, ada 55% (11 dari 20) balok bambu yang nilai beban puncaknya lebih rendah dari kapasitas beban maksimum yang dihitung, P_A . Pada Model B, nilai MOR_b yang digunakan didapat dari persentil ke-5 hasil uji lentur statik dengan selang kepercayaan 75%, sehingga sebanyak 5% (1 dari 20) sampel balok bambu mengalami kegagalan sebelum beban yang dikenakan pada struktur balok mencapai kapasitas beban maksimum rencana P_B . Sementara itu, pada Model C tidak ditemukan balok bambu yang mengalami kegagalan sebelum beban yang dikenakan mencapai kapasitas beban maksimum rencana P_C yang dihitung dengan menggunakan nilai MOR_b hasil persentil ke-5 dengan selang kepercayaan 95%. Penggunaan sifat lentur yang diperoleh dari metode rata-rata (Model A) akan memberikan probabilitas kegagalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan model lain (Model B dan Model C). Akibatnya, risiko kegagalan konstruksi bambu akan lebih tinggi ketika perencana menggunakan nilai sifat mekanik lentur

bambu MOR yang diperoleh dari rata-rata data hasil pengujian lentur statik bambu.

Pengamatan lebih lanjut terhadap kurva beban-lendutan hasil analisis numerik balok bambu yang menggunakan MOR_b yang diperoleh dari nilai persentil ke-5 dari metode ISO 22156 dengan metode hubungan $MOE-MOR$ dilakukan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pemakaian MOR_b yang diperoleh dengan metode hubungan $MOE-MOR$ dalam menghitung kapasitas balok bambu akan memberikan hasil yang lebih konservatif dibandingkan dengan pemakaian MOR_b yang diperoleh dengan metode ISO 22156.

Selain persyaratan kekuatan struktural yang dinyatakan oleh kapasitas beban maksimum balok bambu (P_A , P_B , P_C), masih terdapat persyaratan kekakuan yang harus dipenuhi. Dalam penelitian ini, kekakuan bambu diamati melalui lendutan maksimum yang diijinkan. Mengacu pada SNI 2002

tentang tata cara perencanaan struktur kayu untuk bangunan gedung, lendutan yang terjadi pada struktur tidak boleh melampaui $L/300$, dimana L adalah bentang balok (BSN 2002). Peraturan ini digunakan sebagai acuan dalam penelitian, mengingat belum adanya standar yang secara khusus mengatur struktur bambu di Indonesia.

Dengan menerapkan persyaratan lendutan maksimum, besarnya lendutan ijin dari model balok bambu seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 3 adalah 8,34 mm. Besarnya beban terpusat yang bekerja pada balok bambu ketika lendutan ijin tercapai dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 6. Ketika lendutan ijin tercapai, beban lateral yang bekerja pada balok bambu Model A, Model B, dan Model C masing-masing adalah 495 N, 222 N, dan 255 N.

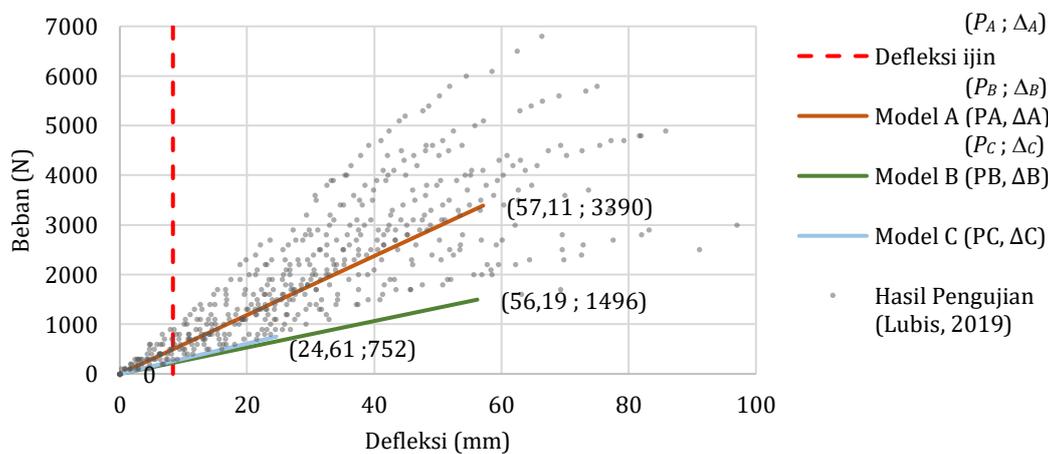
Tabel 6 Beban Terpusat Maksimum pada Saat Lendutan Ijin Tercapai

	Metode rata-rata (Model A)	ISO 22156 (Model B)	Hubungan antara MOE dan MOR (Model C)
P (N)	495	222	255

Gambar 8 menunjukkan bahwa penerapan Model A pada perencanaan struktur balok bambu akan membuat balok bambu menjadi lebih kaku dari kondisi aktualnya. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa lendutan ijin (8,34 mm) dicapai Model A ketika beban titik bekerja sebesar 495 N pada balok bambu. Pada nilai beban titik tersebut, lendutan pada balok yang terjadi pada Model B dan Model C masing-masing adalah 18,60 mm dan 16,21 mm. Nilai lendutan tersebut 223% dan 194% lebih besar dibandingkan dengan lendutan pada Model A.

Mengacu pada Gambar 8 dan Tabel 6, ketika lendutan yang diijinkan terjadi, rasio beban antara Model B terhadap Model C adalah 0,87. Sedangkan, rasio beban maksimum Model B (P_B) terhadap Model C (P_C) adalah 1,99. Hal ini menunjukkan bahwa dalam hal persyaratan kekuatan, Model C akan memberikan hasil yang lebih konservatif dibandingkan dengan Model B. Sebaliknya, dalam hal persyaratan kekakuan, Model B memberikan kapasitas beban yang lebih rendah daripada Model C karena lendutan ijin model B telah tercapai ketika kapasitas beban maksimum P_B masih lebih kecil dari kapasitas beban maksimum P_C . Mempertimbangkan bahwa besarnya beban untuk mencapai lendutan ijin lebih kecil dibandingkan dengan kapasitas beban maksimum rencana, maka dapat disimpulkan bahwa faktor yang paling menentukan dalam perencanaan balok bambu adalah persyaratan kekakuan. Oleh karena itu, penggunaan Model B (ISO 22156) untuk merancang struktur balok bambu dinilai lebih sesuai.

Berdasarkan kurva hubungan beban-lendutan hasil uji lentur statik (Gambar 5 hingga Gambar 7) dapat dilihat bahwa balok bambu memiliki perilaku nonlinier setelah lendutan pada balok bambu melampaui batas proporsionalnya. Sementara itu, model yang dibuat dari penelitian ini mengasumsikan bahwa material bambu berperilaku linier, sehingga kurva hubungan beban-lendutan yang didapatkan juga menunjukkan perilaku linier. Namun demikian, Gambar 8 menunjukkan bahwa lendutan ijin sebesar 8,34 mm terletak di daerah linier. Beban yang bekerja pada saat lendutan ijin tercapai lebih kecil daripada beban maksimum saat MOR_b tercapai, sehingga lendutan menjadi batasan dalam desain struktur balok bambu. Dengan demikian, asumsi bambu sebagai material elastis linier masih dapat digunakan dalam perencanaan dimensi struktur balok bambu.



Gambar 8 Perbandingan Antara Hasil Analisis Numeris dengan Hasil Pengujian Lentur

KESIMPULAN

Penelitian tentang perbandingan perilaku balok bambu menggunakan sifat mekanik yang diperoleh dengan menggunakan metode rata-rata, metode ISO 22156, dan metode hubungan *MOE-MOR* dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan pemahaman dan perhatian perencana Indonesia dalam penerapan nilai persentil ke-5 hasil pengujian lentur statik dalam memperoleh *MOE* dan *MOR* yang digunakan pada perencanaan struktur balok bambu.

Berdasarkan hasil perbandingan terhadap perilaku lentur balok bambu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *MOR_b* yang diperoleh dari metode rata-rata pengujian lentur dalam perencanaan struktur balok bambu tidak direkomendasikan. Dengan menggunakan metode rata-rata, 55% bambu mengalami kegagalan sebelum beban yang bekerja mencapai kapasitas beban maksimum.

Pada tinjauan aspek kekuatan, penggunaan nilai *MOR_b* bambu yang dihitung menggunakan metode hubungan *MOE-MOR* memberikan hasil yang paling konservatif. Pada tinjauan aspek kekakuan, penggunaan *MOE_b* yang diperoleh dari metode ISO 22156 akan memberikan hasil yang paling konservatif.

Berdasarkan hasil penelitian, beban pada saat defleksi maksimum ijin tercapai lebih rendah daripada kapasitas beban maksimum struktur balok bambu sehingga faktor penentu dalam perencanaan struktur balok bambu adalah persyaratan kekakuan. Dengan kata lain, nilai modulus elastisitas *MOE_b* dan modulus patah *MOR_b* yang diperoleh dari metode ISO 22156 lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam desain struktur balok bambu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dukungan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Asmoro, Benediktus Dwi Adi. 2014. "Evaluation of Wide Span Bamboo Truss Building (Case Study : The Temporary Bamboo Building Of Catholic Church St. Jacobus Klodran, Bantul, Yogyakarta)." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Baar, Jan, Jan Tippner, dan Peter Rademacher. 2015. "Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods." *Maderas: Ciencia y Tecnologia* 17 (2): 239–52.

<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>.

- Baillères, Henri, Gary Hopewell, Geoff Boughton, dan Loic Brancheriau. 2012. "Strength and stiffness assessment technologies for improving grading effectiveness of radiata pine wood." *BioResources* 7 (1): 1264–82. <https://doi.org/10.15376/biores.7.1.1264-1282>.
- Baillères, Henri, Garry Hopwell, dan Geoffrey Boughton. 2009. "MOE and MOR Assessment Technologies for Improving Graded Recovery of Exotic Pines in Australia." Victoria.
- BSN. 2002. *SNI 2002- Tata Cara Perencanaan struktur Kayu untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Dey, Abhijeet, dan Nayanmoni Chetia. 2018. "Experimental study of Bamboo Reinforced Concrete beams having various frictional properties." *Materials Today: Proceedings* 5 (1): 436–44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.103>.
- El-Osta, M. L. M, A. Badran, dan A. O. K. El-Wakeel. 1979. "Prediction of Modulus of Rupture from Elasticity for Some Egyptian Hardwoods." *Wood and Fiber*, 147–54.
- Forest Products Laboratory - USDA. 2010. "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material." *General Technical Report FPL–GTR–190*. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/General Technical Report FPL-GTR-190>.
- Gupta, Anu, dan Ajit Kumar. 2008. "Potential of Bamboo in Sustainable Development." *Asia Pacific Business Review* 4 (3): 100–107. <https://doi.org/10.1177/097324700800400312>.
- Hebel, Dirk E, Felix Heisel, Alireza Javadian, Karsten Schlesier, Nikita Aigner, Simon Lee, dan Philipp Müller. 2016. "Green Steel - Constructing Alternatives Out of Bamboo." Exhibition opened on 29.06.2016 at Tokyo University, Japan.
- Howell, David C. 2011. *Fundamental Statistics for the Behavioral Sciences*. Wadsworth: Cengage Learning.
- Huang, Zujian, Yimin Sun, dan Florian Musso. 2017. "Assessment of bamboo application in building envelope by comparison with reference timber." *Construction and Building Materials* 156: 844–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.026>.
- Janseen, Jules J.A. 2000. "Designing and Building with Bamboo." *Audio Over IP*. Beijing: INBAR.

- <https://doi.org/10.1016/b978-0-240-81244-1.00005-5>.
- Kaminski, Sebastian, Andrew Laurence, dan David Trujillo. 2016. "Structural use of bamboo. : Part 1: Introduction to bamboo." *The Structural Engineer: journal of the Institution of Structural Engineer* 94 (8): 40–43.
- Kaminski, Sebastian, Andrew Laurence, David Trujillo, Ian Feltham, dan Felipe López Delgado. 2016. "Structural use of bamboo. Part 3: Design values." *The Structural Engineer: journal of the Institution of Structural Engineer* 94 (12): 42–45.
- Kim, Jae Jin, Sung Suk Lee, Jong Bum Ra, Hwanhwi Lee, Nayoon Huh, dan Gyu Hyeok Kim. 2011. "Fungi associated with bamboo and their decay capabilities." *Holzforschung* 65 (2): 271–75. <https://doi.org/10.1515/HF.2011.004>.
- Liese, W. 2004. "Preservation of a Bamboo Culm in Relation to its Structure." *Simposio Internacional Guadua*, 20–30.
- Lubis, Rizky Oulia Omara P. 2019. "Sifat Mekanika dan Fisika Bambu Wulung." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Majid, Abdul. 2015. "Perancangan Jembatan Pejalan Kaki Rangka Bambu Petung Tipe Howe Truss Bentang 20 meter dengan optimasi Ketinggian Camber." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Muhsin, Ardhiana, Lendya Maria Febriany, dan Hesty Noor Hidayati. 2015. "Material Bambu sebagai Konstruksi pada Great Hall Eco Campus Outward Bound Indonesia" 3 (3): 1–11.
- Mulia, H. Z. 2016. "Perancangan Jembatan Bambu Tipe Asymmetric Cable Stay." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Nugroho, Antaria Dwi. 2008. "Perencanaan Struktur Rumah Bertingkat Tahan Gempa dengan Konstruksi Bambu." Universitas gadjah Mada.
- Nurdiah, Esti Asih. 2016. "The Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 216 (October 2015): 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.004>.
- Paraskeva, T. S., G. Grigoropoulos, dan E. G. Dimitrakopoulos. 2017. "Design and experimental verification of easily constructible bamboo footbridges for rural areas." *Engineering Structures* 143: 540–48. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.044>.
- Patmasari, Dyah. 2006. "Sistem Perencanaan Struktur Bangunan Bambu." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Prihadi, Wisnu Rachmad, dan Galeh Nur Indriatno Putra Pratama. 2016. "Konfigurasi Batang Pada Perancangan Rangka Atap Bambu." *INERSIA - INformasi dan Ekspose hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur* 12 (2): 173–83. <https://doi.org/10.21831/inersia.v12i2.1259>.
- Putra, Bayu Satrio. 2008. "Analisis Struktur Bangunan bambu tahan Gempa serta Pelaksanaanya." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Sari, Indah Permata. 2015. "Perancangan Jembatan Bambu Tipe Arc Bridge Berdasarkan ISO 22156:2004." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Singha, Bebija L, dan R K Borah. 2017. "Traditional methods of post harvest bamboo treatment for durability enhancement." *International Journal of Scientific & Engineering Research* 8 (1): 518–22.
- Sohel, Md Shawkat Islam, Mohammed Alamgir, Sayma Akhter, dan Mizanur Rahman. 2015. "Carbon storage in a bamboo (*Bambusa vulgaris*) plantation in the degraded tropical forests: Implications for policy development." *Land Use Policy* 49: 142–51. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.011>.
- Technical Committee ISO/TC 165. 2004. "ISO 22156:2004 Bamboo — Structural design." Switzerland.
- Wu, Wenqing. 2014. "Experimental analysis of bending resistance of bamboo composite I-shaped beam." *Journal of Bridge Engineering* 19 (4): 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000557).
- Wulandari, Oktarina. 2015. "Redesain Jembatan Bambu Pejalan Kaki di Berbah, DIY." Tugas Akhir. Universitas Gadjah Mada.
- Ye, Fei, dan Wenxi Fu. 2018. "Physical and mechanical characterization of fresh bamboo for infrastructure projects." *Journal of Materials in Civil Engineering* 30 (2): 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002132).