



# **ANALISA PERFORMA BALOK SEDERHANA BERTULANG BAMB**

## **Studi Literatur Pada Ketidak-linieran Sifat Mekanis Serat Bambu**

**Hendri Hermawan<sup>1</sup>, M Alvan Riski<sup>2</sup>, Atik Wahyuni<sup>3\*</sup>**

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

[hendrihermawan@umsida.ac.id](mailto:hendrihermawan@umsida.ac.id)<sup>1</sup>, [alvanrizki@umsida.ac.id](mailto:alvanrizki@umsida.ac.id)<sup>2</sup>, [atikwahyuni@umsida.ac.id](mailto:atikwahyuni@umsida.ac.id)<sup>3\*</sup>

### **ABSTRAK**

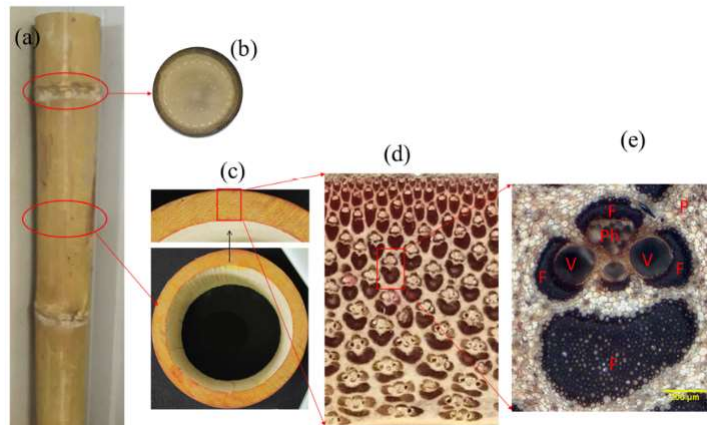
Keseimbangan antara kebutuhan volume beton dan besar beban yang harus ditahan tetap menjadi sebuah studi progresif dari waktu ke waktu, karena hal tersebut memiliki keterkaitan erat dengan taraf perekonomian masyarakat. Standarisasi beton untuk bangunan gedung secara intuitif belum tepat guna jika diterapkan untuk rumah sederhana, dimana pembahasan tersebut diperluas lagi oleh faktor taraf pendidikan pelaksana pembangunan. Jika menilik konsep *green building* peradaban masa sekarang, adalah sangat mungkin untuk terus menyempurnakan studi performa balok beton bertulangan bambu. Dari berbagai macam jenis bambu yang sudah diteliti, artikel ilmiah ini membagi menjadi dua tolak ukur yang memberikan nilai perbedaan performa yaitu serat bambu terluar dan serat bambu terdalam. Pembatasan benda uji ke bentuk nilai rasio balok dan tulangan 1% sampai 2% akan digunakan dalam pemodelan 3 dimensi memanfaatkan program bantu ABAQUS. Perilaku tidak-linear terhadap hasil akhir lendutan dan regangan menyerupai grafik parabola menunjukkan perbedaan serat luar dan serat dalam sampai 40%.

**Kata Kunci:** tidak-linear, ABAQUS, bambu

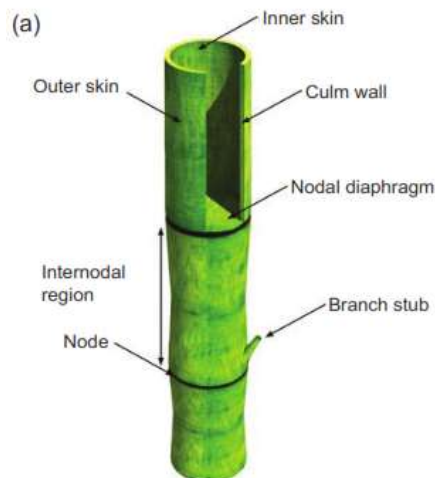
### **1. PENDAHULUAN**

Peningkatan literasi masyarakat telah menjadi perhatian khusus dari praktisi akademisi ketika mengadakan sosialisasi dengan tema konstruksi bangunan sederhana tahan gempa (Ahmad & Widiyansah, 2020). Dimana hal tersebut paralel dengan rencana percepatan roda perekonomian masyarakat desa Sukogidri Ledokombo Jember, yang dimana tim Pengabdian Program Pengembangan Desa Mitra (PPDM) mencanangkan program pembangunan jembatan dengan bambu sebagai tulangan utama nya (Muhtar & Gunasti, 2020)

Bambu secara garis besar bisa terbagi menjadi beberapa bagian seperti yang terlihat di Gambar 1 maupun Gambar 2, dan selanjutnya menurut (M. Ahmad & Kamke, 2005) culm bambu adalah bagian yang sebagian besar mengandung bahan seperti kayu. Sementara (Tan et al., 2011a) mengusulkan persamaan empiris untuk menghitung kekakuan, tegangan, dan fraksi volume, dan beberapa solusi numerik analitis diusulkan oleh (Silva et al., 2006) yang memodelkan bambu sebagai bahan yang memiliki fungsi gradasi. Mereka menggunakan gradasi metode elemen hingga pada tingkat sel bambu untuk menangkap secara spasial variasi nilai kekakuan untuk selanjutnya merumuskan secara isoparametrik.

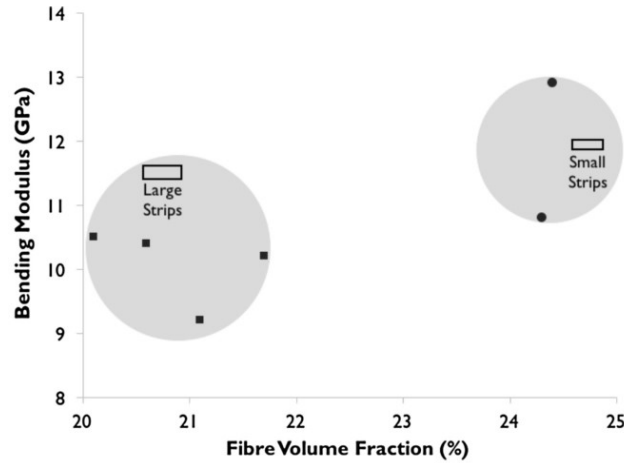


**Gambar 1.** Morfologi dari batang bambu. (a) Bagian dari culm bambu; (b) Potongan melintang bambu; (c) potongan internode; (d) Molekular dari dinding bambu; (e) Vessel-V; Fiber-F; Phloem-Ph; Parenchyma-P. (Kadivar et al., 2020)



**Gambar 2.** Skema dari batang bambu secara segmental. (Trujillo & López, 2016)

Tingkat kontras warna alami bambu dapat menjadi petunjuk informasi yang lebih dalam terhadap tingkat kekuatan material. Segmen balok beton dapat dioptimalkan untuk memanfaatkan rasio kekuatan lentur yang tinggi terhadap massa jenis. Penelitian tentang pengaruh orientasi kekakuan bahkan dapat memungkinkan untuk optimasi lebih lanjut (Sharma et al., 2015). Gambar 3 menunjukkan bahwa distribusi serat bambu menunjukkan konsistensi terhadap luasan strip/lajur suatu bambu. Fraksi volume didefinisikan oleh (Qiao & Davalos, 2013) sebagai rasio volume serat yang ada dengan total volume layer/lapisan.



**Gambar 3.** Diagram hubungan antara fraksi volume dan modulus lentur (Penellum et al., 2018)

## 2. METODOLOGI

Perbandingan *property* mekanis dari bambu yang menjadi acuan dalam perhitungan artikel ini mengacu pada Table 1 yang sudah dilakukan sebelumnya oleh (Al-Rukaibawi et al., 2021), dimana nilai tersebut selanjutnya akan dijadikan nilai input untuk 4 perumusan analitis yang terdahulu dan menentukan variasi nilai modulus young's dari 4 perspektif rumus.

**Table 1.** Sifat elastis dari serat bambu (f) dan matriks bambu (m)

Konstanta Elastis	Modulus Young (GPa)		Rasio Poisson		Fraksi Volume (%)	
	$E_f$	$E_m$	$\nu_f$	$\nu_m$	$V_f$	$V_m$
Bag. Dalam	54.19	2.16	0.28	0.34	8.53	91.47
Bag. Tengah 1	55.53	2.16	0.28	0.34	12.69	87.31
Bag. Tengah 2	57.6	2.16	0.28	0.34	21.86	78.14
Bag. Terluar	64	2.16	0.28	0.34	47.2	52.8
Sumber Data	(Low et al., 2006)	(Tan et al., 2011b)	(Zhou et al., 2012)	(Wang et al., 2017)	(Low et al., 2006)	dari 1- $V_f$

*Rule of Mixture (ROM)* adalah model sederhana yang dikenal luas sebagai *iso-strain Voigt* (Voigt, 1889), masing-masing diterapkan untuk polikristal. Model Voigt mengasumsikan bahwa strain dalam konstituen konstan. Pendekatan pertama digunakan untuk pembebanan aksial sedangkan yang kedua digunakan untuk pembebanan melintang. Hubungan analitis untuk model Voigt diberikan sebagai

$$E_{11} = V_f E_{11}^f + V_m E_{11}^m \quad (1)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_{12}^f + V_m \nu_{12}^m \quad (2)$$

Model ini adalah model semi-empiris berdasarkan model *self-consistent* yang dikembangkan oleh Hill (Hill, 1965). Ini juga dikenal sebagai ROM yang ditingkatkan yang diterapkan secara luas untuk memprediksi modulus Young melintang dan modulus geser dalam bidang (Zhao et al., 2018). Model ini cenderung memperbaiki ketidakcocokan tegangan pada serat dan matriks dengan memperkenalkan parameter semi-empiris  $\eta$  dan faktor penguat  $\xi$ . Modulus Young  $E_{11}$  dan rasio Poisson  $\nu$  dapat diprediksi seperti pada model ROM. Modulus Young melintang adalah

$$E_{22} = \left( \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \right) E^m \quad (3)$$

$$G_{12} = \left( \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \right) G^m \quad (4)$$

$$G_{23} = \left( \frac{1+\xi\eta V_f}{1-\eta V_f} \right) G^m \quad (5)$$

Model ini banyak digunakan untuk memprediksi sifat elastis serat matriks (Sendekyj et al., 1989). Chamis berasumsi bahwa serat dan matriks elastis linier, dan serat ditempatkan secara berkala dalam susunan persegi atau heksagonal. Oleh karena itu, model ini tidak dapat mempertimbangkan perubahan dalam konfigurasi geometris. Formulasinya menyediakan kelima sifat elastis independen untuk komposit matriks dan serat. Modulus elastis  $E$  dan rasio Poisson  $\nu$  dapat diperkirakan seperti pada model ROM, Modulus Young melintang adalah

$$E_{22} = E_{33} = \frac{E^m}{1-\sqrt{V_f}\left(1-\frac{E^m}{E^f}\right)} \quad (6)$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = \frac{G^m}{1-\sqrt{V_f}\left(1-\frac{G^m}{G^f}\right)} \quad (7)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (8)$$

Model ini, yang dikembangkan oleh Mori dan Tanaka berdasarkan tensor tegangan rata-rata Eshelby dalam matriks (Candelaria & Hernandez, 2019) dikenal sebagai teknik homogenisasi elastis yang tepat. Ini dianggap sebagai perkiraan akurat untuk sifat kekakuan serat-matriks

$$K = \frac{E^m \left[ E^m V_m + 2K_f(1+\nu_m)(1+V^f(1-2\nu_m)) \right]}{2(1+\nu_m) \left[ E^m(1+V^f-2\nu_m) + 2V^m K_f(1-\nu_m-2\nu_m^2) \right]} \quad (9)$$

(c)

dan (c)

merangkum hasil yang diperoleh oleh empat analitis metode dan dengan dua metode homogenisasi berbasis RVE numerik bersama dengan data eksperimen yang tersedia. Hasilnya, secara umum, menunjukkan bahwa modulus elastis  $E_{11}$  sepanjang arah longitudinal dapat diprediksi dan sebanding dengan fraksi volume serat bambu, Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa model-model sebelumnya melintang isotropik, bertentangan dengan struktur mikro bambu asli. Alasan di balik ini adalah bahwa model sebelumnya menyederhanakan variasi geometris yang sebenarnya struktur mikro bambu dan karenanya seragam batas yang diterapkan Traksi pada bundel serat yang berbeda akan menimbulkan strain yang berbeda

**Table 2.** Konstanta Elastis di posisi **terluar** bambu, dari beberapa perspektif rumus analitik.(Al-Rukaibawi et al., 2021)

Konstanta Model	Young's Modulus (GPa)		
	E <sub>11</sub>	E <sub>22</sub>	E <sub>33</sub>
Outer Layer	Fraksi Volume Serat = 47%		
IROM	31.395	5.745	5.745
M-T	31.393	5.37	5.37
H-T	31.39	6.994	6.994
Chamis	31.39	6.426	6.426
Anatomy RVE	31.272	6.417	8.472
Experiment	30.30	-	-

(a)

Konstanta Model	Poisson's Ratio		
	$\nu_{11}$	$\nu_{22}$	$\nu_{33}$
Outer Layer	Fraksi Volume Serat = 47%		
IROM	0.32	0.32	0.42
M-T	0.3	0.3	0.44
H-T	0.31	0.31	0.44
Chamis	0.31	0.31	0.44
Anatomy RVE	0.3	0.3	0.26
Experiment	-	-	-

(b)

Konstanta Model	Modulus Geser (GPa)		
	G <sub>11</sub>	G <sub>22</sub>	G <sub>33</sub>
Outer Layer	Fraksi Volume Serat = 47%		
IROM	-	-	-
M-T	2.085	2.085	1.858
H-T	2.085	2.085	1.858
Chamis	2.405	2.405	2.405
Anatomy RVE	2.201	2.920	1.850
Experiment	-	-	-

(c)

**Table 3.** Konstanta Elastis di posisi **terdalam** bambu, dari beberapa perspektif rumus analitik.(Al-Rukaibawi et al., 2021)

Konstanta Model	Young's Modulus (GPa)		
	E <sub>11</sub>	E <sub>22</sub>	E <sub>33</sub>
Inner Layer	Fraksi Volume Serat = 8.53%		
IROM	6.6037	3.026	3.026
M-T	6.599	2.644	2.644
H-T	6.598	2.691	2.691
Chamis	6.598	3.001	3.001

Anatomy RVE	6.54	2.51	2.553
Experiment	6.65	-	-

(a)

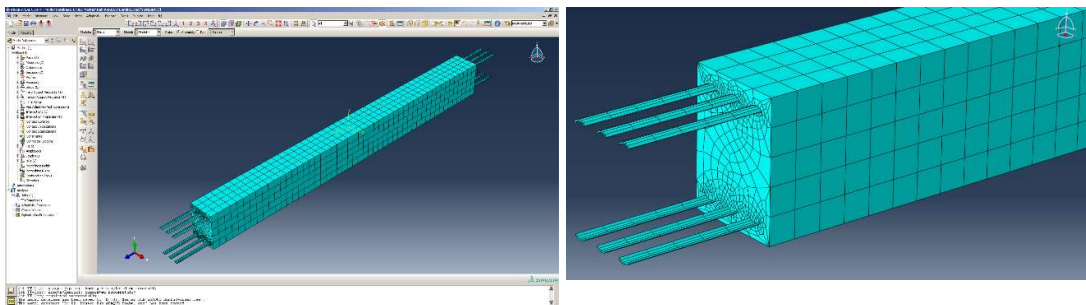
Konstanta Model	Poisson's Ratio		
	$\nu_{11}$	$\nu_{22}$	$\nu_{33}$
Outer Layer	Fraksi Volume Serat = 8.53%		
IROM	0.34	0.34	0.43
M-T	0.33	0.33	0.43
H-T	0.33	0.33	0.43
Chamis	0.33	0.33	0.43
Anatomy RVE	0.33	0.33	0.43
Experiment	-	-	-

(b)

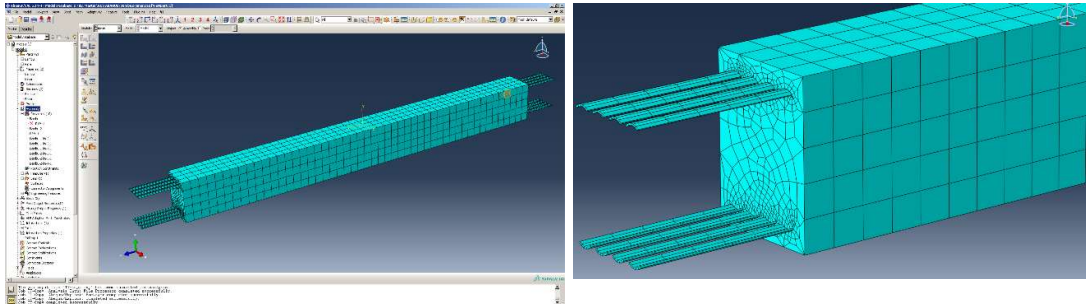
Konstanta Model	Modulus Geser (GPa)		
	$G_{11}$	$G_{22}$	$G_{33}$
Outer Layer	Fraksi Volume Serat = 8.53%		
IROM	-	-	-
M-T	0.944	0.944	0.919
H-T	0.944	0.944	0.919
Chamis	1.12	1.12	1.12
Anatomy RVE	0.949	0.931	0.898
Experiment	-	-	-

(c)

Sedangkan untuk balok beton akan mengikuti model yang sudah dibuat oleh (Osei & Adom-Asamoah, 2018) yaitu menggunakan bambu sebagai penahan momen lentur. Penyatuan beberapa bagian seperti balok beton dan tulangan bambu akan dimodelkan dengan program bantu ABAQUS. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan hasil *assembly*/perakitan benda uji, dengan beban dan perletakan mengikuti kondisi riil di bangunan rumah sederhana.



**Gambar 4.** Model balok bertulangan bambu (rasio tulangan vs luas penampang balok 1%)



**Gambar 5.** Model balok bertulangan bambu (rasio tulangan vs luas penampang balok 2%)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian harus didukung dengan data yang cukup. Hasil penelitian dan penemuannya harus menjadi jawaban, atau hipotesis penelitian yang dikemukakan sebelumnya pada bagian pendahuluan.

Berikut ini adalah hasil uji coba performa balok dengan menggunakan serat terluar dan terdalam, dimana pada tabel 4 dan tabel 5 merupakan hasil dengan rasio 1% dan tabel 6 dan tabel 7 dengan rasio 2%. Dari hasil uji ini dapat dilihat bahwa pada rasio tulangan 1% dan 2%, penggunaan serat terdalam dapat menaikkan lendutan serta meningkatkan kekakuan jika dibandingkan dengan penggunaan serat terluar.

**Table 4.** Hasil uji coba performa balok dengan rasio **1%** dan menggunakan serat terluar

Pembebanan	Stress (Mpa)	Strain	Lendutan (mm)
Gravitasi	361.37	0.05565	-71.265
750 kg/m	360.84	0.05276	-71.226
1500 kg/m	359.32	0.05277	-71.02

**Table 5.** Hasil uji coba performa balok dengan rasio **1%** dan menggunakan serat terdalam

Pembebanan	Stress (Mpa)	Strain	Lendutan (mm)
Gravitasi	370.19	0.0546	-73.037
750 kg/m	370.01	0.0576	-73.033
1500 kg/m	369.86	0.0545	-72.98

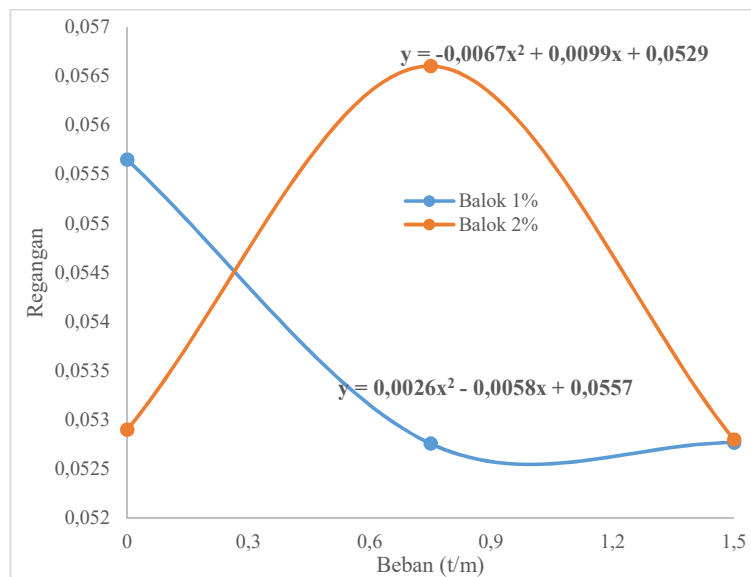
**Table 6.** Hasil uji coba performa balok dengan rasio **2%** dan menggunakan serat terluar

Pembebanan	Stress (Mpa)	Strain	Lendutan (mm)
Gravitasi	346.54	0.0529	-71.388
750 kg/m	345.93	0.0566	-71.351
1500 kg/m	346.47	0.0528	-71.315

**Table 7.** Hasil uji coba performa balok dengan rasio **2%** dan menggunakan serat terdalam

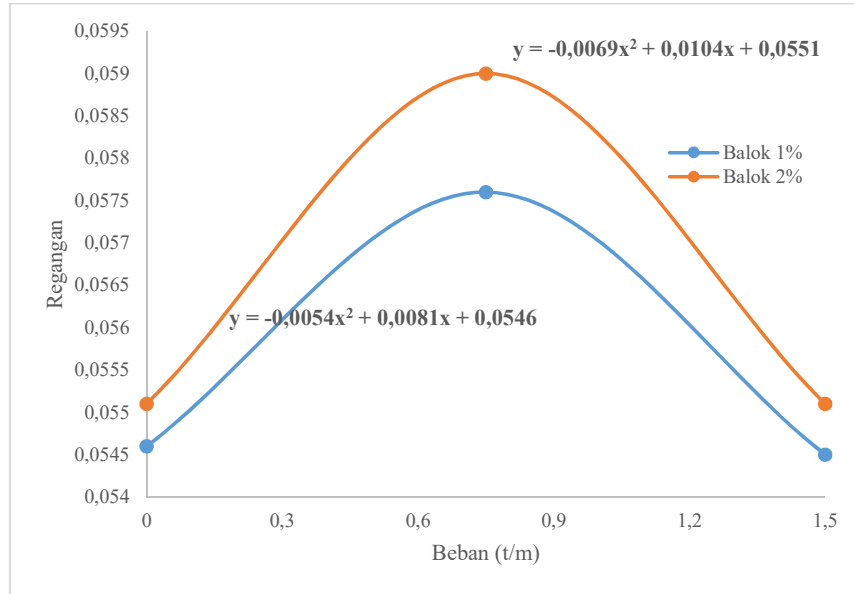
Pembebanan	Stress (Mpa)	Strain	Lendutan (mm)
Gravitasi	354.45	0.0551	-73.497
750 kg/m	354.29	0.059	-72.914
1500 kg/m	354.09	0.0551	-73.443

Perbandingan regangan dengan beban untuk material bambu serat terluar (gambar 6), rasio balok 1% dan 2% menunjukkan pola parabola namun dengan arah puncak yang berlawanan. Sedangkan perbandingan regangan dengan beban untuk bambu serat terdalam (gambar 7), rasio balok 1% dan 2% menunjukkan pola parabola yang sama.

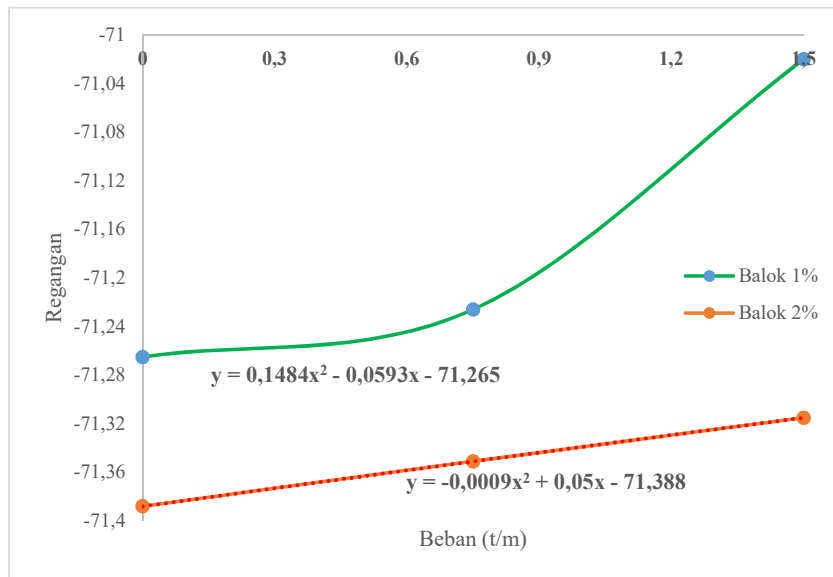


**Gambar 6.** Perbandingan regangan vs beban (t/m) untuk material bambu serat terluar



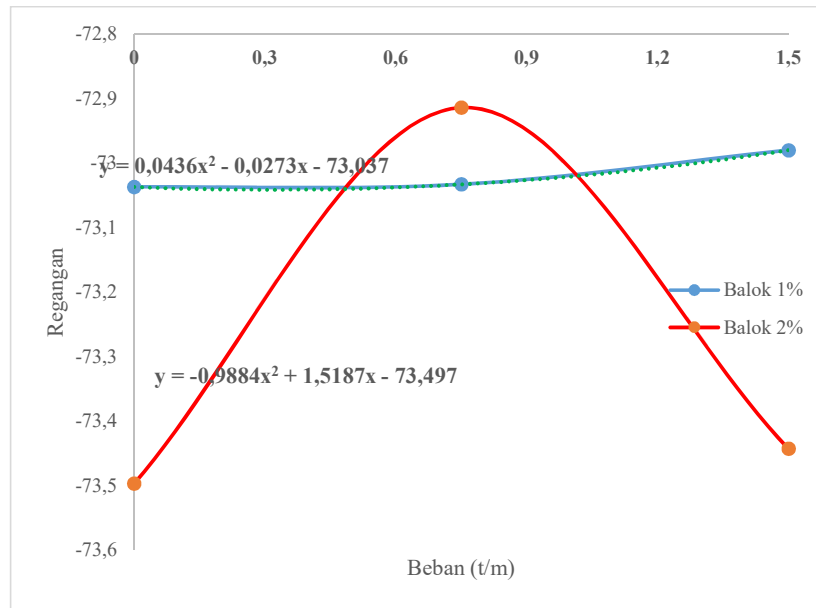


**Gambar 7.** Perbandingan regangan vs beban (t/m) untuk material bambu serat terdalam



**Gambar 8.** Perbandingan lendutan (mm) vs beban (t/m) untuk material bambu serat terluar

Perbandingan antara lendutan dan beban untuk material bamboo serat terluar (gambar 8), rasio balok 1% menunjukkan pola parabola sedangkan rasio balok 2% cenderung lebih linier. Sedangkan untuk material bamboo serat terdalam, rasio balok 1% cenderung lebih linier dibandingkan dengan rasio balok 2%.



**Gambar 9.** Perbandingan lendutan (mm) vs beban (t/m) untuk material bambu serat terdalam

Interaksi dan hubungan spasial antara  $E_f$  dan  $E_m$  berpengaruh pada sifat komposit beton berserat bambu, pengamatan yang dilakukan dari gambar bidang kegagalan dan tes lentur cincin datar 'terpotong' menunjukkan bahwa komponen harus dianggap sebagai non-isotropik homogen dan transversal (Akinbade, 2011). Sedangkan menurut (Osei & Adom-Asamoah, 2018) lendutan dan kompresi garis netral dari model elemen hingga terhadap data eksperimen balok beton bertulang menunjukkan nilai perbedaan sekitar 6%.

#### 4. KESIMPULAN

Mekanisme kegagalan yang diperkuat balok beton dimodelkan dengan cukup baik menggunakan analisis elemen hingga, dan Beban kegagalan diprediksi sangat dekat ke beban kegagalan yang diukur selama pengujian eksperimental. Modulus Young  $E_{11}$  tidak sensitif terhadap variasi bentuk serat. Namun modulus Young's  $E_{22}$  dan  $E_{33}$  (arah transversal) sensitif terhadap geometri serat aktual karena anisotropi transversal yang melekat bahan bambu. Modulus geser  $G_{12}$ ,  $G_{13}$   $G_{23}$  sensitif terhadap geometri cluster serat. Ini juga merupakan konsekuensi dari anisotropi transversal bambu dan model RVE berbasis anatomi. Efek ukuran strip menunjukkan bahwa strip yang lebih kecil menyebabkan peningkatan yang signifikan dalam fraksi volume serat dari bagian yang dihasilkan. Ini meningkatkan serat fraksi volume berkorelasi erat dengan kekakuan lentur yang lebih tinggi diamati pada balok yang dibuat dengan strip yang lebih kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa bambu laminasi dapat dimodelkan sebagai serat yang diperkuat gabungan. (Penellum et al., 2018).

Variasi dalam persentase tulangan mempengaruhi kekakuan dari balok. Persentase yang lebih tinggi membuat balok lebih kaku dan sebaliknya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa alam yang unik pengaturan mikrostruktur akan membantu desain dan pembuatan kelas baru struktur penyerap energi berkinerja tinggi untuk aplikasi rekayasa dunia nyata. Desain struktural parametrik bioinspired yang diusulkan menyediakan structural Topologi untuk

mengoptimalkan geometri struktur dengan memaksimalkan energi penyerapan, dan efisiensi kekuatan hancur dalam penelitian masa depan.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Ahmad, H. H., & Widiyansah, D. (2020). Sosialisasi Konstruksi Bangunan Sederhana Tahan Gempa. In *Jurnal Pengabdian Masyarakat Ipteks* (Vol. 6, Issue 2).
- Ahmad, M., & Kamke, F. A. (2005). Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: physical and mechanical properties. *Wood Science and Technology*, 39(6), 448–459. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0016-y>
- Akinbade, Y. A. (2011). *Mechanical and Morphological Characterization of Full-Culm Bamboo*.
- Al-Rukaibawi, L. S., Omairey, S. L., & Károlyi, G. (2021). A numerical anatomy-based modelling of bamboo microstructure. *Construction and Building Materials*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125036>
- Candelaria, Ma. D. E., & Hernandez, Jr., J. Y. (2019). DETERMINATION OF THE PROPERTIES OF BAMBUSA BLUMEANA USING FULL-CULM COMPRESSION TESTS AND LAYERED TENSILE TESTS FOR FINITE ELEMENT MODEL SIMULATION USING ORTHOTROPIC MATERIAL MODELING. *ASEAN Engineering Journal*, 9(1), 54–71. <https://doi.org/10.11113/aej.v9.15508>
- Hill, R. (1965). Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials—III. self-consistent model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(4), 189–198. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(65\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90008-6)
- Kadivar, M., Gauss, C., Ghavami, K., & Savastano, H. (2020). Densification of bamboo: State of the art. In *Materials* (Vol. 13, Issue 19, pp. 1–25). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13194346>
- Low, I. M., Che, Z. Y., Latella, B. A., & Sim, K. S. (2006). Mechanical and Fracture Properties of Bamboo. *Key Engineering Materials*, 312, 15–20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.312.15>
- Muhtar, & Gunasti, A. (2020). *Jembatan Pracetak Beton Bertulang Bambu Untuk Meningkatkan Roda Perekonomian Masyarakat Desa Sukogidri Ledokombo Jember*.
- Osei, J., & Adom-Asamoah, M. (2018). *Finite Element Modelling of Bamboo Reinforced Concrete Beams*. <https://www.researchgate.net/publication/326082946>
- Penellum, M., Sharma, B., Shah, D. U., Foster, R. M., & Ramage, M. H. (2018). Relationship of structure and stiffness in laminated bamboo composites. *Construction and Building Materials*, 165, 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.166>
- Qiao, P., & Davalos, J. F. (2013). Design of all-composite structures using fiber-reinforced polymer (FRP) composites. In *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering* (pp. 469–508). Elsevier.

<https://doi.org/10.1533/9780857098955.2.469>

- Sendeckyj, G., Wang, S., Steven Johnson, W., Stinchcomb, W., & Chamis, C. (1989). Mechanics of Composite Materials: Past, Present, and Future. *Journal of Composites Technology and Research*, 11(1), 3. <https://doi.org/10.1520/CTR10143J>
- Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- Silva, E. C. N., Walters, M. C., & Paulino, G. H. (2006). Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials. *Journal of Materials Science*, 41(21), 6991–7004. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0232-3>
- Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S. M., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K., & Soboyejo, W. O. (2011a). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, 7(10), 3796–3803. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S. M., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K., & Soboyejo, W. O. (2011b). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, 7(10), 3796–3803. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- Trujillo, D., & López, L. F. (2016). Bamboo material characterisation. In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials* (pp. 365–392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100038-0.00013-5>
- Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen Der Physik*, 274(12), 573–587. <https://doi.org/10.1002/andp.18892741206>
- Wang, Y. Z., Zhang, C. L., & Chen, W. Q. (2017). An analytical model to predict material gradient and anisotropy in bamboo. *Acta Mechanica*, 228(8), 2819–2833. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1514-0>
- Zhao, X., Wang, G., & Wang, Y. (2018). Micromechanical modeling in determining the transverse elastic moduli and stress distributions of bamboo. *Journal of Materials Science*, 53(4), 2553–2565. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1692-3>
- Zhou, A., Huang, D., Li, H., & Su, Y. (2012). Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo. *Construction and Building Materials*, 35, 191–196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.011>