

# REVIEW PEMODELAN NUMERIK MATERIAL BAMBU

H. Z. Arifin, I. S. Irawati\*, A. Awaludin

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada,  
Jalan Grafika No. 2 Yogyakarta, Indonesia

\*E-mail: inggar\_septhia@ugm.ac.id

## Abstract

Nowadays, construction development brings back the concept of using environmentally friendly renewable materials. Bamboo as a green material has some excellent characters such as a high strength-to-weight ratio and a relatively short harvesting period. Understanding on its structural behaviour and capacity, commonly obtained from a series of laboratory tests, is required in order to be able to widely use bamboo as a building material. Time and testing equipment limitation make numerical modelling become an alternative to overcome these problems. On the other side, anatomy of bamboo material is unique. There are properties irregularities along and across the bamboo culm. Numerical modelling of bamboo material is certainly different from numerical modelling of steel or concrete material due to the bamboo's irregularities. This paper reviews some published journals on numerical modelling of bamboo culm and laminated bamboo. It highlights software used for modelling, numerical modelling method, material properties input, as well as comparison of numerical and experimental results that have been previously carried out. It is found that model which take into account the bamboo irregularities and orthotropic material gave numerical results closed to the experimental.

**Keywords:** *bamboo properties, full-culm bamboo, laminated bamboo, numerical modelling, structural bamboo*

## Abstrak

Perkembangan konstruksi yang pesat saat ini memunculkan kembali konsep penggunaan material terbarukan yang ramah lingkungan. Bambu sebagai *green material* memiliki beberapa keunggulan seperti rasio kekuatan yang tinggi dan masa panen yang relatif cepat. Untuk menggunakan bambu secara lebih luas diperlukan informasi mengenai perilaku dan kapasitas dari struktur bambu yang umumnya diperoleh melalui serangkaian pengujian laboratorium. Keterbatasan waktu dan ketersediaan alat pengujian membuat pemodelan numerik sebagai salah satu alternatif solusi mengatasi permasalahan tersebut. Di lain sisi, anatomi dari material bambu memiliki karakter yang unik. Terdapat ketidakberaturan pada material bambu baik sepanjang batang maupun pada penampang melintangnya. Memodelkan material bambu secara numerik tentu tidak sama dengan memodelkan beton ataupun baja, yang mana beberapa hal dapat dilakukan penyederhanaan. Paper ini menyajikan *review* dari beberapa referensi yang sudah dipublikasikan tentang pemodelan numerik struktur bambu dan bambu laminasi. Topik yang ditinjau adalah *software* yang digunakan untuk pemodelan, metode pemodelan dan input *material properties*, serta perbandingan hasil analisis dengan hasil eksperimen yang dilakukan. Diketahui bahwa model yang memperhatikan ketidakseragaman pada batang bambu dan menggunakan material ortotropik memberikan hasil yang lebih dekat dengan hasil eksperimen.

**Kata kunci:** *sifat bambu, bambu utuh, bambu laminasi, pemodelan numerik, struktur bambu*

## PENDAHULUAN

Bambu merupakan salah satu material konstruksi terbarukan yang ramah lingkungan. Bambu memiliki beberapa keunggulan, di antaranya banyak ditemukan terutama di wilayah Indonesia, masa panen yang relatif singkat, dan kekuatan sejajar serat yang cukup tinggi. Batang bambu memiliki usia matang dan dapat dipanen pada usia 3-5 tahun, setelah umur 5-6 tahun batang bambu akan menua dan kualitasnya menurun

(Kaminski, Laurence, dan Trujillo 2016). Kekuatan tarik sejajar serat bambu dapat mencapai lebih dari 200 MPa (Oka et al. 2014). Batang bambu banyak digunakan untuk material konstruksi, misalnya untuk elemen struktural. Selain itu bambu juga digunakan sebagai elemen arsitektural untuk menambah nilai estetika suatu bangunan.

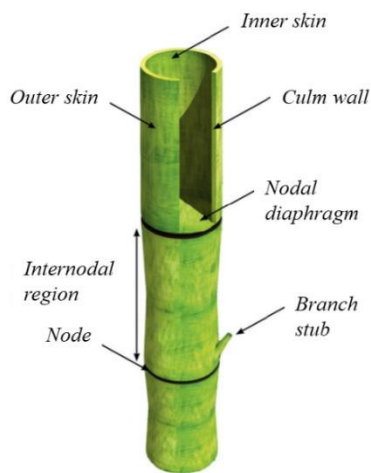
Penggunaan bambu untuk elemen struktural didahului dengan perancangan struktur, di antaranya menggunakan standar perancangan untuk struktur bambu ISO 22156 tahun 2021. Nilai-nilai desain acuan didapatkan dari pengujian sifat mekanika mengikuti standar ISO 22157 tahun 2019. Prediksi kapasitas suatu elemen struktur dapat juga dilakukan dengan pengujian eksperimental di laboratorium. Permasalahan yang muncul adalah keterbatasan waktu dan ketersediaan alat untuk melakukan pengujian laboratorium tersebut. Pemodelan numerik (misalnya berupa model *finite element*) merupakan salah satu alternatif untuk mengatasi permasalahan tersebut (Silva, Walters, dan Paulino 2006).

Meskipun bambu dan kayu sama-sama merupakan material organik, namun bambu memiliki karakteristik penampang batang tersendiri (Chaowana 2013). Karakteristik tersebut membuat pemodelan numerik yang dilakukan berbeda dengan material kayu, juga berbeda dengan beton atau baja. Paper ini memaparkan beberapa contoh penggunaan model numerik dalam memprediksi kapasitas atau perilaku material bambu dalam bentuk bambu utuh maupun bambu laminasi. Melalui paper ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman tentang hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemodelan numerik sehingga hasil yang diperoleh mendekati dan sesuai dengan kondisi *real*.

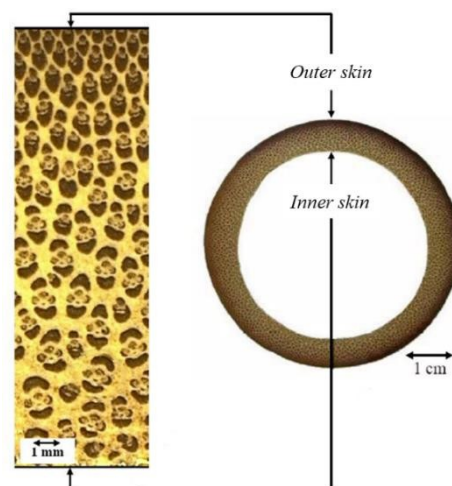
## **ANATOMI DAN SIFAT FISIKA BAMBU**

Bambu merupakan kelompok tumbuhan rumput-rumputan dalam famili *poaceae* dan subfamili *bambusoides*. Terdapat lebih dari 1200 spesies bambu di seluruh dunia, tersebar di wilayah tropis dan subtropis seperti di wilayah Asia dan Amerika Selatan. Berdasarkan sistem akarnya bambu dibedakan menjadi kelompok monopodial dan simpodial (Chaowana 2013). Batang bambu berbentuk lingkaran berongga dan dipisahkan oleh ruas-ruas pada jarak tertentu (Gambar 1). Bagian ruas merupakan sistem diafragma alami yang berfungsi memberikan kekuatan pada batang bambu ketika tumbuh. Jarak antar ruas berkisar antara 250-500 mm, dimana pada batang bagian atas jarak ruasnya relatif lebih panjang dibandingkan bagian bawah (Kaminski et al. 2016).

Struktur penampang batang bambu tersusun dari ikatan pembuluh yang memiliki arah serat sejajar dengan sumbu longitudinal batang bambu, dan dikelilingi oleh jaringan parenkima. Komposisi jaringan parenkima sejumlah 50%, serat 40%, dan sel konduktor 10%. Persentase tersebut berbeda-beda baik dari bagian dalam ke kulit luar penampang maupun sepanjang batang. Pada bagian kulit jumlah serat relatif lebih banyak dibandingkan bagian dalam (Gambar 2). Sedangkan jumlah serat sepanjang batang paling banyak ditemukan pada batang bagian atas, dimana komposisi parenkima pada bagian atas berkurang dibandingkan bagian bawah (Chaowana 2013).



Gambar 1. Struktur Batang Bambu  
(Kaminski et al. 2016)



Gambar 2. Distribusi Ikatan Pembuluh  
*D. asper* (Chaowana 2013)

Karakteristik dari batang bambu secara alami tersebut memiliki pengaruh terhadap sifat mekanika dari batang bambu. Keberadaan dari ruas tidak terlalu berpengaruh terhadap kekuatan mekanika, kecuali untuk kuat tarik sejajar serat dimana kuat tarik sejajar serat bagian ruas lebih rendah dibandingkan dengan kuat tarik bagian antar ruas. Kekuatan mekanika pada bagian kulit secara umum lebih tinggi dibandingkan bagian dalam. Perbedaan posisi batang yaitu pada bagian bawah, tengah, dan atas memiliki pengaruh berupa kenaikan kekuatan mekanika pada batang bagian atas seperti kuat tekan, kuat tarik sejajar dan tegak lurus serat, serta kuat gesernya (Oka et al. 2014). Dalam perancangan, penampang batang bambu sering dianggap memiliki bentuk lingkaran sempurna dan ukurannya sama sepanjang batang. Kenyataannya batang bambu tidak lurus, memiliki bentuk penampang oval, dan ukuran diameter bawah biasanya lebih besar dibandingkan bagian atas (*tapered*). Ketidaklurusan dari batang bambu seperti pada *G. apus* dapat disebabkan oleh proses pertumbuhan dari batang yang berkelompok.

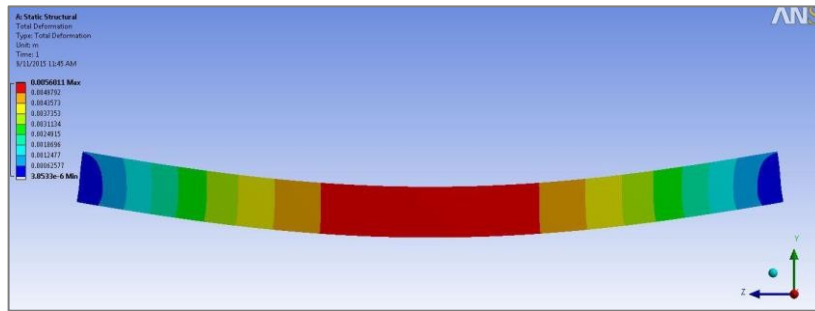
Tingkat oval dari penampang pada *G. apus* berkisar antara 0,909-0,904 dengan nilai 1,0 adalah penampang dengan bentuk lingkaran sempurna. Sedangkan nilai rata-rata perbedaan ukuran diameter bagian bawah dan atas (*tapered*) dibagi dengan panjang batang adalah sebesar 0,002 (Nurmadina, Nugroho, dan Bahtiar 2017).

## PEMODELAN BAMBU UTUH

Pemodelan numerik material bambu umumnya menggunakan *software* berbasis *finite element method* (metode elemen hingga). Beberapa *software* yang digunakan antara lain seperti Abaqus, ANSYS, FEMAP, dan ADINA. Penggunaan dari masing-masing *software* tergantung dari preferensi setiap peneliti. *Software* lain digunakan untuk mendukung pengembangan model numerik seperti Solidworks untuk membuat geometri model pada ANSYS (Castaneda dan Bjarnadottir 2016), *subroutine* UMAT untuk mendefinisikan *material properties* pada Abaqus (Abzarrah et al. 2020; Akinbade et al. 2021), dan LS-DYNA pada FEMAP (Ramful dan Sakuma 2020).

Mondal et al. (2020), Chand et al. (2008), Candelaria dan Hernandez Jr (2019) melakukan pemodelan numerik untuk mengetahui sifat mekanika tarik sejajar serat dan lentur bilah bambu. Visualisasi lendutan yang terjadi pada model numerik dapat dilihat pada Gambar 3. Zhao et al. (2014) meneliti perilaku kegagalan getas (*brittle failure mechanism*) pada pengujian tarik belah. Garcia et al. (2012) dan Akinbade et al. (2021) mengevaluasi konstanta elastis dan sifat mekanika pada arah transversal. Ramful dan Sakuma (2020) meneliti mekanisme keretakan pada variasi beban dari bambu jenis *Phyllostachys bambusoides*. Lefevre et al. (2019) menggunakan model numerik untuk memprediksi performa dari tipe baru sambungan bambu yang dikembangkan.

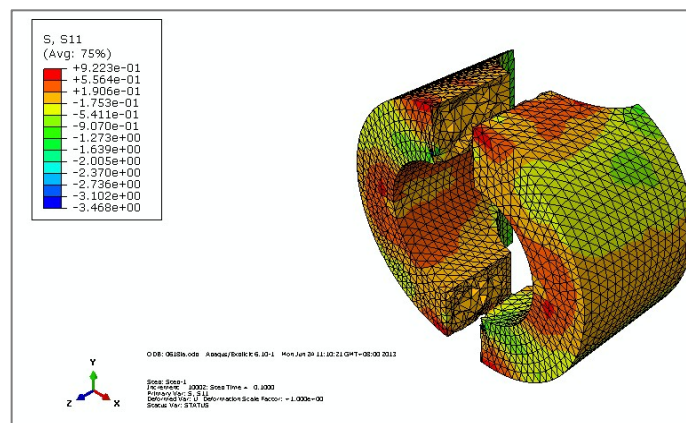
Langkah awal dalam pemodelan adalah memodelkan geometri. Dengan menggunakan *software finite element* dimungkinkan untuk memodelkan secara tiga dimensi (3D) menggunakan *solid element*. Pengaturan *meshing* berupa tipe dan ukuran *mesh* dilakukan sehingga didapatkan hasil yang konvergen (Mondal et al. 2020). Tipe *mesh* yang umum digunakan di antaranya adalah tetrahedral (C3D4) atau hexahedral (C3D8). Menurut Akinbade et al. (2021) elemen hexahedral memiliki tingkat konvergensi yang lebih baik dibanding elemen tetrahedral. Dalam memodelkan penampang bambu utuh diperlukan data dimensi penampang seperti diameter dan ketebalan, selain itu secara spesifik perlu dimodelkan juga keberadaan dari ruas (Lefevre et al. 2019).



Gambar 3. Visualisasi Lendutan Benda Uji Lentur pada ANSYS (Candelaria dan Hernandez Jr 2019)

Input *material properties* dalam pemodelan dilakukan berdasarkan hasil pengujian sifat mekanika. Nilai input untuk *material properties* seperti modulus elastisitas dan angka Poisson yang kemudian menurunkan nilai modulus geser, diperlukan untuk membentuk persamaan konstitutif material. Jenis material dalam pemodelan bambu utuh dapat berupa material isotropik, isotropik transversal, maupun ortotropik dengan perilaku linear maupun nonlinear, dimana masing-masing akan menghasilkan tingkat kedekatan dengan pengujian eksperimental yang berbeda.

Secara umum model dengan material isotropik atau rata-rata modulus elastisitas di sepanjang batang cukup untuk memprediksi perilaku global struktur (Mondal et al. 2020; Akinbade et al. 2021), sedangkan penggunaan material ortotropik nonlinear dapat diperoleh hasil yang lebih dekat dengan eksperimental dan cocok untuk melihat perilaku lokal seperti pada sambungan (Silva et al. 2006; Candelaria dan Hernandez Jr, 2019). Selain itu, nilai *fail stress* dan *fracture energy* dapat didefinisikan untuk memodelkan perilaku belah (Gambar 4) sebagaimana pada pengujian tarik belah (Zhao et al. 2014).

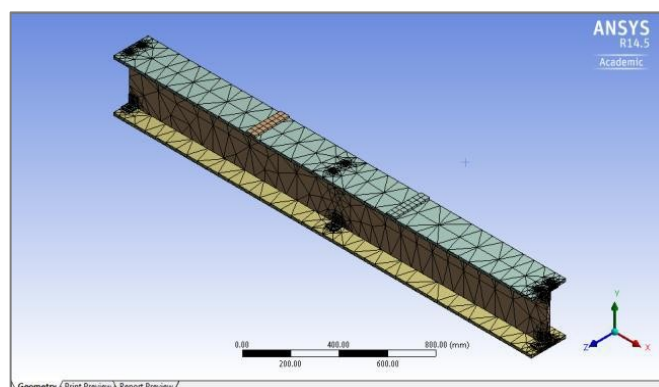


Gambar 4. Nefogram Tegangan Saat Benda Uji Gagal (Zhao et al. 2014)

## PEMODELAN BAMBU LAMINASI

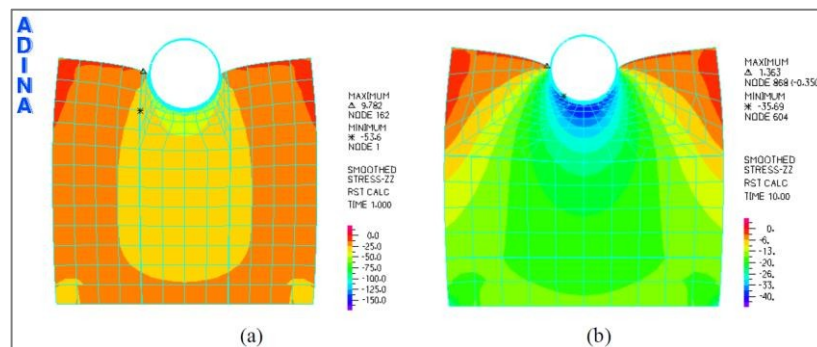
*Software* yang digunakan untuk memodelkan bambu laminasi secara numerik tidak jauh berbeda dengan yang digunakan untuk memodelkan bambu utuh. Abzari et al. (2020) menggunakan Abaqus dengan dukungan *subroutine* UMAT untuk memodelkan benda uji bambu laminasi pada skema pengujian lentur tiga titik pembebanan (*three-point bending*). Castaneda dan Bjarnadottir (2016) memodelkan balok bambu komposit berbentuk profil-I menggunakan ANSYS. Eratodi et al. (2014) dan Khoshbakht et al. (2018) menggunakan ADINA untuk memodelkan kuat tumpu dari bambu laminasi (bambu glulam dan *laminated veneer bamboo*).

Pada penelitian yang dilakukan Abzari et al. (2020) spesimen lentur dibedakan berdasarkan potongan bilah penyusunnya, menjadi arah radial dan tangensial. Pemodelan material berupa ortotropik nonlinear pada Abaqus dilakukan dengan bantuan *subroutine* UMAT. Grafik tegangan-regangan masing-masing arah (longitudinal, radial, dan transversal) dari hasil pengujian sifat mekanika diperlukan untuk menyusun persamaan konstitutif. Hasil pemodelan berupa nilai lendutan cukup mendekati hasil eksperimental, dimana selisih pada arah radial sebesar 1,95% dan arah tangensial 10,96%. Castaneda dan Bjarnadottir (2016) membuat geometri model balok komposit profil-I dengan menggunakan Solidworks. Pada bagian sambungan antara papan bambu laminasi dengan baut dilakukan *meshing* dengan ukuran yang lebih kecil agar dapat melihat konsentrasi tegangan yang terjadi dengan lebih teliti (Gambar 5). Material didefinisikan sebagai isotropik transversal dan berperilaku bilinear. Melalui model yang dikembangkan dapat diketahui konfigurasi optimal dari sambungan balok komposit profil-I.



Gambar 5. Pemodelan Benda Uji Balok Profil-I dalam ANSYS (Castaneda dan Bjarnadottir 2016)

Pemodelan kuat tumpu bambu laminasi yang dilakukan oleh Eratodi et al. (2014) dan Khoshbakht et al. (2018) menggunakan model dua dimensi (2D). Perbedaan antara keduanya ada pada idealisasinya, menjadi *plane strain* dan *plane stress*. Pada penelitian Eratodi et al. (2014) kontak antara material bambu laminasi dengan baut dapat didefinisikan berupa *surface-to-surface* dengan koefisien friksi sebesar 0,7. Dibedakan tipe pembebanan berdasarkan arah serat bambu laminasi (sejajar dan tegak lurus serat arah radial dan arah tangensial). Hasil pemodelan numerik menunjukkan bahwa kuat tumpu arah sejajar serat lebih tinggi dibandingkan arah tegak lurus serat (Gambar 6).



Gambar 6. Hasil Analisis Numerik Berupa Kuat Tumpu Bambu Glulam (a) Sejajar Serat, (b) Tegak Lurus Serat (Eratodi et al. 2014)

Secara lebih lengkap, rangkuman perbandingan pemodelan numerik bambu utuh dan bambu laminasi yang dilakukan oleh beberapa peneliti disajikan pada Tabel 1. Perbandingan meliputi jenis pengujian eksperimental yang dilakukan, idealisasi geometri dan material yang digunakan, serta kesesuaiannya dengan hasil pengujian eksperimental.

## KESIMPULAN

Pemodelan numerik dapat digunakan untuk memprediksi kapasitas dan perilaku struktur bambu utuh maupun bambu laminasi. Abaqus, ANSYS, ADINA, FEMAP adalah di antara *software* yang umum digunakan untuk pemodelan, di mana penggunaannya sesuai preferensi dari setiap peneliti. Tingkat detail geometri dari model seperti keberadaan ruas dan kemiripan dengan konfigurasi pengujian eksperimental menentukan hasil pemodelan numerik. Selain itu, definisi *material properties* berupa ortotropik nonlinear dirasa lebih sesuai digunakan untuk mewakili material bambu yang mana dapat memberikan hasil yang lebih dekat terhadap pengujian eksperimental.

Tabel 1. *Review* Pemodelan Numerik Bambu Utuh dan Bambu Laminasi

Peneliti	Pengujian	Software	Detail Geometri	Model Material	Validasi
<b>Bambu utuh (<i>full-culm bamboo</i>)</b>					
Lefevre et al. (2019)	lentur balok kantilever	ANSYS	<i>half-model</i> , keberadaan	ortotropik	71,0% beban maks.
Mondal et al. (2020)	kuat tarik (ISO 22157:2004)	Abaqus	keberadaan ruas ( <i>high &amp; low fidelity model</i> )	isotropik homogen	92,0% ( <i>high</i> ); 81,0% ( <i>low</i> )
Garcia et al. (2012)	sifat mekanika transversal (protokol baru)	Abaqus	elemen C3D8I	isotropik transversal	hasil serupa (dengan kalibrasi kekakuan)
Candelaria & Hernandez Jr. (2019)	uji lentur bilah (ASTM D143)	ANSYS	penampang empat lapis	isotropik, ortotropik	80,74% (isotropik); 96,63% (ortotropik)
Chand et al. (2008)	kuat tarik, kuat lentur	Abaqus	elemen C3D8R, ukuran	isotropik (lentur), isotropik transversal (tarik)	hasil serupa
Ramful & Sakuma (2020)	-	FEMAP, LS-DYNA	<i>mesh 1 mm solid &amp; hollow</i> , homogen & nonhomogen	isotropik transversal	-
Akinbade et al. (2021)	kuat belah (ISO 22157:2019)	Abaqus, UMAT <i>subroutine</i>	nonhomogen	isotropik transversal, ortotropik	
Zhao et al. (2014)	kuat tarik belah	Abaqus	elemen C3D4	isotropik, <i>fail stress</i> , <i>fracture energy</i>	> 80%
<b>Bambu laminasi (<i>laminated bamboo</i>)</b>					
Abzari et al. (2020)	lentur tiga titik (ASTM D143)	Abaqus, UMAT <i>subroutine</i>	arah susunan lamina: radial dan tangensial	ortotropik nonlinear	98,05% (radial); 89,04% (tangensial)
Castaneda & Bjarnadottir (2016)	-	ANSYS, Solidworks	ukuran <i>mesh</i> bagian sambungan diperhalus	isotropik transversal	-
Eratodi et al. (2014)	kuat tumpu sambungan dowel (ASTM D5764)	ADINA	arah serat bambu laminasi, definisi kontak	ortotropik elastis linear	hasil serupa
Khoshbakht et al. (2018)	kuat tumpu sambungan dowel (ASTM D5764)	ADINA	ukuran <i>mesh</i> dekat lubang diperhalus	ortotropik elastis linear	hasil serupa (dengan kalibrasi modulus elastis)



## DAFTAR PUSTAKA

- Abzari, Abdul Widayat, Inggar Septhia Irawati, and Bambang Suhendro. 2020. "Nonlinear Numerical Model of Glued-Laminated Petung Bamboo Under Flexural Test Based on ASTM D 143-94." presented in 5<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Material (Under Publication Process).
- Akinbade, Yusuf, Ian Nettleship, Christopher Papadopoulos, and Kent A. Harries. 2021. "Modelling Full-Culm Bamboo as a Naturally Varying Functionally Graded Material." *Wood Science and Technology* 55(1):155–79.
- Candelaria, Ma Doreen Esplana, and Jaime Yabut Hernandez Jr. 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.
- Castaneda, Hernan, and Sigridur Bjarnadottir. 2016. "Analysis of the Bolted Connection of a Bamboo Composite I-Shaped Beam Subjected to Bending." *Procedia Engineering* 145(860):796–803.
- Chand, Navin, Mukul Shukla, and Manoj Kumar Sharma. 2008. "Analysis of Mechanical Behaviour of Bamboo (*Dendrocalamus Strictus*) by Using FEM." *Journal of Natural Fibers* 5(2):127–37.
- Chaowana, Pannipa. 2013. "Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites." *Journal of Materials Science Research* 2(2).
- Eratodi, I Gusti Lanang Bagus, Andreas Triwiyono, Ali Awaludin, and Tibertius Agus Prayitno. 2014. "The Effect of Specific Gravity on Embedding Strength of Glued-Laminated (Glulam) Bamboo: Numerical Analysis and Experiment." *ASEAN Civil Engineering Conference* 3(1):1–11.
- García, José Jaime, Christian Rangel, and Khosrow Ghavami. 2012. "Experiments with Rings to Determine the Anisotropic Elastic Constants of Bamboo." *Construction and Building Materials* 31:52–57.
- Kaminski, Sebastian, Andrew Laurence, and David Trujillo. 2016. "Structural Use of Bamboo (Part 1: Introduction to Bamboo)." *The Structural Engineer* 94(8):40–43.
- Khoshbakht, Niloufar, Peggi L. Clouston, Sanjay R. Arwade, and Alexander C. Schreyer. 2018. "Computational Modeling of Laminated Veneer Bamboo Dowel

- Connections.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(2).
- Lefevre, Benoit, Roger West, Peter O’Reilly, and David Taylor. 2019. “A New Method for Joining Bamboo Culms.” *Engineering Structures* 190(February):1–8.
- Mondal, Bapi, Damodar Maity, and Puneet Kumar Patra. 2020. “Tensile Characterisation of Bamboo Strips for Potential Use in Reinforced Concrete Members: Experimental and Numerical Study.” *Materials and Structures* 53(5):1–15.
- Nurmadina, Naresworo Nugroho, and Effendi Tri Bahtiar. 2017. “Structural Grading of Gigantochloa Apus Bamboo Based on Its Flexural Properties.” *Construction and Building Materials* 157:1173–89.
- Oka, Gusti Made, Andreas Triwiyono, Ali Awaludin, and Suprpto Siswosukarto. 2014. “Effects of Node, Internode and Height Position on the Mechanical Properties of Gigantochloa Atroviolacea Bamboo.” *Procedia Engineering* 95(April 2015):31–37.
- Ramful, Raviduth, and Atsushi Sakuma. 2020. “Investigation of the Effect of Inhomogeneous Material on the Fracture Mechanisms of Bamboo by Finite Element Method.” *Materials* 13(21):1–15.
- Silva, Emílio Carlos Nelli, Matthew C. Walters, and Glaucio H. Paulino. 2006. “Modeling Bamboo as a Functionally Graded Material: Lessons for the Analysis of Affordable Materials.” *Journal of Materials Science* 41(21):6991–7004.
- Zhao, Zhang Rong, Wan Si Fu, Jian Bo Zhou, and Wang Han. 2014. “Study on Finite Element Model for Splitting Capacity of Bamboo Culms.” *Applied Mechanics and Materials* 494–495:558–62.