

Analisis *Layer System* Bambu Laminasi Berdasarkan Penyebaran Kerapatan Ikatan Pembuluhnya

(Layered System Analyze on Laminated Bamboo Based on the Density Distribution of its Vascular Bundles)

Effendi Tri Bahtiar^{*}, Naresworo Nugroho, Surjono Surjokusumo, Lina Karlinasari, Atmawi Darwis

ABSTRAK

Secara anatomi, bambu disusun oleh sel-sel yang heterogen. Komponen anatomi bambu yang memberi sumbangan terbesar pada sifat mekanisnya ialah ikatan pembuluh, sehingga kerapatan ikatan pembuluh dapat digunakan sebagai peubah dasar untuk menganalisis sifat mekanis bambu. Kerapatan ikatan pembuluh menurun secara bertahap dari tepi hingga ke dalam bambu sehingga dapat diturunkan suatu fungsi linear ataupun nonlinear sebagai pendekatanannya. Nisbah modulus elastisitas (E) yang lazim digunakan pada metode *transformed cross section* (TCC), pada penelitian ini dicoba diganti dengan nisbah ikatan pembuluh dengan asumsi bahwa keduanya adalah ekuivalen. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa terdapat nilai korelasi Pearson yang tinggi antara hasil teoretis dan hasil empiris, sedangkan hasil uji *t-student* data berpasangan menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan di antara keduanya. Dengan demikian, model transformasi yang diturunkan dapat digunakan untuk menganalisis sistem lapis (*layer system*) baik pada bilah bambu maupun bambu laminasi dengan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan. Dari ketiga model transformasi terpilih (*linear*, logaritmik, dan *power*) model *power* adalah model yang terbaik karena menghasilkan nilai yang paling mendekati data empiriknya.

Kata kunci: bambu, bambu laminasi, ikatan pembuluh, model, sifat mekanis, *transformed cross section*

ABSTRACT

Anatomically, bamboo is constructed from many types of cells. Vascular bundles are the cells which give the highest contribution to the bamboo strength, thus the density distribution of vascular bundles could be used as the main variable for analyzing the layer system of bamboo strip and laminated bamboo. The density of vascular bundles distribution decreases gradually from the outer to inner part in a regular manner which could be fitted by linear or nonlinear function. Ratio of modulus of elasticity (E) which widely used in transformed cross section (TCC) method for analyzing the layer system are substituted by ratio of density distribution of vascular bundles with assumption that both are highly correlated. The data in this study proved that there are high Pearson's correlation between the theoretical and the empirical result, and the paired *t-student* test also showed both are not significantly different; thus, this new method could be applied in very good result. There are 3 models applied in this study, namely linear, logarithm, and power. Power model is the best among others since its theoretical gives the nearest estimation to the empirical measurement.

Keywords: bamboo and laminated bamboo, mechanical properties, model, *transformed cross section*, *vascular bundles*

PENDAHULUAN

Bambu merupakan tumbuhan monokotil yang tumbuh sangat cepat. Hal ini menjadikan bambu sebagai material yang sangat menjanjikan sebagai substitusi kayu untuk sumber selulosa maupun bahan konstruksi. Bambu berbentuk silinder berongga berupa ruas-ruas yang disambung oleh buku. Seperti halnya material alami yang berasal dari organisme biologis, struktur anatomi bambu tersusun atas sel-sel yang sangat heterogen. Namun, sebagian besar aplikasi konsep dasar *continuum* mekanik memerlukan asumsi bahwa material haruslah diidealisasi sebagai material sempurna yang homogen. Konsep tersebut telah digunakan secara luas karena menyederhanakan kerumitan permasalahan yang

timbul akibat heterogenitas struktur anatomi material.

Sifat mekanis bambu sangat dipengaruhi oleh struktur anatominya. Dibandingkan komponen anatomi lainnya, ikatan pembuluh (*vascular bundles*) merupakan komponen anatomi yang berfungsi memberikan kekuatan pada batang bambu (Li & Shen 2011). Kekuatan dan kekakuan bambu sangat dipengaruhi oleh jumlah dan luas ikatan pembuluh per satuan luas penampang. Semakin rapat ikatan pembuluh, maka kekuatan dan kekakuannya meningkat pula. Pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa bagian tepi (dekat kulit) memiliki ikatan pembuluh yang sangat rapat, selanjutnya ke arah dalam semakin jarang (Andre 1998; Mustafa *et al.* 2011). Lebih lanjut kondisi ini mengakibatkan kekuatan dan kekakuan bambu yang cenderung semakin rendah dari tepi ke dalam (Ray *et al.* 2005). Analisis mekanika dengan mempertimbangkan variasi kekuatan dan kekakuan ini pada berbagai bagian bambu, lebih mendekati kondisi aktual daripada

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

^{*} Penulis Korespondensi: E-mail: bahtiar_et@yahoo.com

mengasumsikan bambu sebagai material yang homogen.

Pada bidang aksial, kekuatan dan kekakuan bambu bergradasi menurun dari tepi ke luar. Sebuah fungsi tertentu (linear atau nonlinear) dapat digunakan untuk menduga pola degradasi tersebut. Selanjutnya karena hubungan yang erat antara kerapatan ikatan pembuluh (jumlah ikatan pembuluh per satuan luas) dengan sifat mekanis bilah bambunya, maka pola gradasi ini dapat diturunkan lebih lanjut sebagai fungsi kerapatan ikatan pembuluh. Bilah bambu dapat diasumsikan sebuah sistem lapisan (*layer system*) yang kekuatan dan kekakuan tiap lapisnya merupakan fungsi dari kerapatan ikatan pembuluh. Berkaitan dengan hal tersebut, metode TCC dapat digunakan sebagai salah satu alat analisis yang cukup memadai untuk menduga kekuatan dan kekakuan bilah bambu maupun bambu laminasi.

Penelitian ini mengamati sebaran kerapatan ikatan pembuluh pada penampang melintang bambu, menyusun fungsi ideal jarak terhadap kerapatan ikatan pembuluh, dan selanjutnya melakukan analisis mekanika pengaruh ikatan pembuluh terhadap sifat penampang dan modulus elastisitas (MOE) bambu laminasi 2-lapis. Dari 3 konfigurasi bambu laminasi yang disusun, yaitu luar-dalam (LD), luar-luar (LL), dan dalam-dalam (DD) dihitung efisiensi kekakuan yang dihasilkan.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain bilah bambu tali, betung, dan andong berukuran 6 meter yang diperoleh dari pangkalan bambu di Bogor. Peralatan yang digunakan antara lain mikroskop, *Universal Testing Machine* (UTM) Instron Type 3369, dan alat-alat pengerjaan kayu.

Penelitian ini dilakukan dalam 5 tahap, yaitu persiapan bahan, pengamatan anatomi, analisis sifat penampang bilah bambu, analisis sifat penampang bambu laminasi 2-lapis dan pembuatan dan pengujian bambu laminasi.:

1 Persiapan bahan

Buluh bambu sepanjang 6 m dikeringudarkan, lalu dipotong menjadi 3 bagian, yaitu pangkal, tengah, dan ujung. Setiap bagian dipotong ruasnya sepanjang 1,5–2 cm untuk pengamatan anatomi, sedangkan sisanya digunakan untuk sampel uji tarik sejajar serat dan bahan baku bambu laminasi 2-lapis.

2 Pengamatan anatomi

Ruas bambu yang telah dipotong, disayat bagian penampang lintangnya kemudian diletakkan di atas preparat. Sampel diamati dengan mikroskop dengan perbesaran 10x, kemudian difoto dengan peranti lunak Motic Images Plus 2.0 ML. Setiap foto dipotong secara digital menjadi 5 bagian dari arah tepi ke dalam selanjutnya kerapatan ikatan pembuluh dinyatakan sebagai jumlah ikatan pembuluh per luas

area yang dihitung pada setiap potongan foto. Media jarak dari tepi pada setiap potongan foto digunakan sebagai titik pusat pengamatan. Kerapatan ikatan pembuluh diplotkan pada diagram kartesius dengan jarak dari tepi sebagai ordinatnya. Kerapatan ikatan pembuluh selanjutnya dinyatakan dalam fungsi jarak dari tepi yang diperoleh dari regresi linear maupun nonlinear (logaritmik dan power).

3 Analisis sifat penampang bilah bambu

Dengan batasan bahwa kekakuan dan kekuatan bambu terutama disumbangkan oleh kerapatan ikatan pembuluh, maka nisbah modulus elastisitas pada setiap posisi adalah ekuivalen dengan nisbah kerapatan ikatan pembuluh (Persamaan 1), maka lebar penampang tertransformasi dalam metode TCC dapat dimodifikasi dengan nisbah kerapatan ikatan pembuluh sebagai substitusi dari nisbah modulus elastisitas (Persamaan 2).

$$\frac{E_i}{E_j} \approx \frac{v_i}{v_j} \dots \dots \dots (1)$$

$$b_i \approx \frac{E_i}{E_j} b_j \approx \frac{v_i}{v_j} b_j \dots \dots \dots (2)$$

Berhubung kerapatan ikatan pembuluh merupakan fungsi dari jarak, maka persamaan 2 dapat diubah menjadi:

$$b_i \approx \frac{f(y_i)}{f(y_j)} b_j \dots \dots \dots (3)$$

Apabila bilah bambu bagian pusat (yaitu sejauh 7,5 mm dari tepi) dipilih sebagai referensi, dan bilah bambu dibuat berukuran lebar (b) 20 mm, maka:

$$b_i \approx \frac{f(y_i)}{f(7,5)} 20 \dots \dots \dots (4)$$

Apabila bilah bambu setebal 10 mm dibuat dengan menghilangkan kulit luar setebal 2 mm dan matriks bagian dalam, maka sifat-sifat penampang tertransformasi secara umum diperoleh berdasarkan rumus:

a. Luas penampang:
 $A_{(tcs)} = \int_2^{12} 20 \frac{f(y_i)}{f(7,5)} dy \dots \dots \dots (5)$

b. Momen pertama penampang:
 $Q_{(tcs)} = \int_2^{12} y 20 \frac{f(y_i)}{f(7,5)} dy \dots \dots \dots (6)$

c. Sentroid:
 $C_{(tcs)} = \frac{Q_{(tcs)}}{A_{(tcs)}} - 2 \dots \dots \dots (7)$

d. Momen Inersia penampang pada sumbu x:
 $I_{(xc)tcs} = \int_2^{12} y^2 20 \frac{f(y_i)}{f(7,5)} dy \dots \dots \dots (8)$

e. Momen inersia penampang pada sentroid:
 $I_{(xc)tcs} = I_{(x)tcs} - C_{(tcs)}^2 A_{(tcs)} \dots \dots \dots (9)$

Khusus untuk model linear, penampang tertransformasi berbentuk trapesium sehingga sifat-sifat penampang dapat diselesaikan secara lebih sederhana dengan cara membaginya menjadi 5 bagian, yaitu empat bagian segitiga siku-siku dan satu bagian persegi empat. Dengan demikian rumus sifat-sifat penampang berikut dapat digunakan:

a. Luas penampang:

$$A_{\Delta} = \frac{bh}{2} \dots\dots\dots(10)$$

$$A_{\blacksquare} = bh \dots\dots\dots(11)$$

$$A = \sum_{i=1}^5 A_i \dots\dots\dots(12)$$

b. Sentroid:

$$C_{\Delta} = \frac{h}{3} \dots\dots\dots(13)$$

$$C_{\blacksquare} = \frac{h}{2} \dots\dots\dots(14)$$

$$C_{(tcs)} = \frac{\sum_{i=1}^5 c_i A_i}{\sum_{i=1}^5 A_i} \dots\dots\dots(15)$$

c. Momen inersia penampang pada sentroid setiap bidang:

$$I_{\Delta} = \frac{bh^3}{36} \dots\dots\dots(16)$$

$$I_{\blacksquare} = \frac{bh^3}{12} \dots\dots\dots(17)$$

d. Momen inersia penampang pada sentroid:

$$I_{(xc)tcs} = \sum_{i=1}^5 I_i + C_i - C_{(tcs)}^2 A_i \dots\dots\dots(18)$$

4 Analisis sifat penampang bambu laminasi 2- lapis

Bambu laminasi 2-lapis dibuat dengan 3 konfigurasi, yaitu luar-dalam (LD), luar-luar (LL), dan dalam-dalam (DD), sebagaimana disajikan pada Gambar 1.

Lebar setiap penampang kemudian ditransformasikan sesuai dengan persamaan 4, sehingga diperoleh bentuk geometri penampang tertransformasi. Selanjutnya sifat-sifat penampang dihitung sebagai:

a. Luas penampang:

$$A = \sum_{i=1}^2 A_{i(tcs)} \dots\dots\dots(19)$$

b. Sentroid:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^2 c_{i(tcs)} A_{i(tcs)}}{\sum_{i=1}^2 A_{i(tcs)}} \dots\dots\dots(20)$$

c. Momen inersia penampang pada sentroid:

$$I_{eff} = \sum_{i=1}^2 I_{i(xc)tcs} + C_{i(tcs)} - C^2 A_{i(tcs)} \dots\dots\dots(21)$$

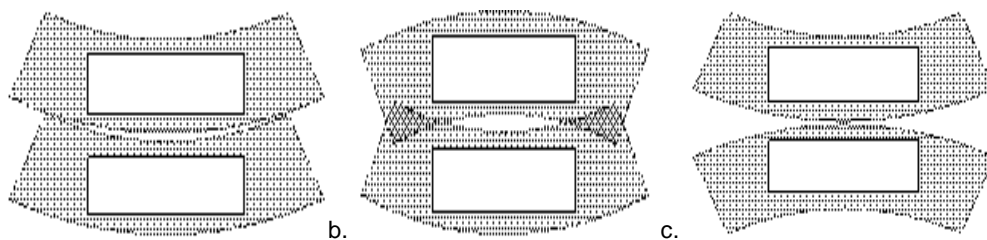
d. Momen inersia penampang aktual:

$$I_{(act)} = \frac{bh^3}{12} = \frac{20 \times 20^3}{12} = 13333,33 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(22)$$

Nisbah modulus elastisitas bambu laminasi 2-lapis (E efektif) dibandingkan bilah bambu bagian pusat (E_p)

$$R = \frac{E_{eff}}{E_p} = \frac{I_{eff}}{I_{(act)}} \times 100\% \dots\dots\dots(23)$$

Selanjutnya efisiensi bambu laminasi 2-lapis (S) dinyatakan dengan:



Gambar 1 Konfigurasi bambu laminasi 2-lapis: (a) luar-dalam (LD), (b) luar-luar (LL), dan (c) dalam-dalam (DD).

$$S = \frac{E_{eff} - E_p}{E_p} \times 100\% = \frac{E_{eff}}{E_p} - 1 \times 100\% = R - 1 \times 100\% \dots\dots\dots(24)$$

5 Pembuatan dan pengujian bambu laminasi

Ketiga konfigurasi bambu laminasi 2-lapis (LD, LL, dan DD) dibuat dari 3 jenis bambu, yaitu tali, betung, dan andong; masing-masing dari bagian pangkal, tengah, dan ujung. Setiap bagian (pangkal, tengah, dan ujung) bertindak sebagai ulangan, dan setiap ulangan dibuat 2 sampel uji sebagai sub-ulangan. Dengan demikian terdapat (3 x 3 x 3 x (2)) = 54 sampel uji yang dibuat. Selanjutnya sampel uji diuji lentur dengan konfigurasi *center point loading*, mengacu pada ASTM D143-94(2000)e1.

Untuk memverifikasi efisiensi teoretis dengan data empiris, data dianalisis secara bertahap, yaitu

a. Sebagai data acuan adalah modulus elastisitas bambu laminasi 2-lapis dengan konfigurasi luar-dalam (LD) (E_{LD})

b. Selanjutnya modulus elastisitas bambu laminasi 2-lapis dengan konfigurasi luar-luar (E_{LL}) dan dalam-dalam (E_{DD}) dikurangi dengan E_{LD} sehingga diperoleh nisbah ΔE terhadap E_{LD} (Persamaan 25 dan 26):

$$R_{E(LL)} = \frac{E_{LL} - E_{LD}}{E_{LD}} \times 100\% \dots\dots\dots(25)$$

$$R_{E(DD)} = \frac{E_{DD} - E_{LD}}{E_{LD}} \times 100\% \dots\dots\dots(26)$$

c. Nisbah hasil teoretis diperoleh dengan rumusan:

$$R_{R(LL)} = \frac{S_{LL} - S_{LD}}{S_{LD} + 100} \times 100\% \dots\dots\dots(27)$$

$$R_{R(DD)} = \frac{S_{DD} - S_{LD}}{S_{LD} + 100} \times 100\% \dots\dots\dots(28)$$

d. Untuk menguji validitas nisbah hasil empiris dibanding nisbah hasil teoretis dilakukan uji *t*-student dengan hipotesis:

$$H_0 : R_E - R_R \neq 0$$

$$H_1 : R_E - R_R = 0$$

Apabila H_0 ditolak dan H_1 diterima, maka dapat dinyatakan bahwa nisbah hasil empiris tidak berbeda dengan nisbah hasil teoretis. Kondisi tersebut memiliki konsekuensi hasil teoretis adalah cukup memadai untuk menduga hasil empiris, sehingga nisbah kerapatan ikatan vaskular bambu dapat digunakan untuk menggantikan nisbah modulus elastisitas pada metode *transformed cross section*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

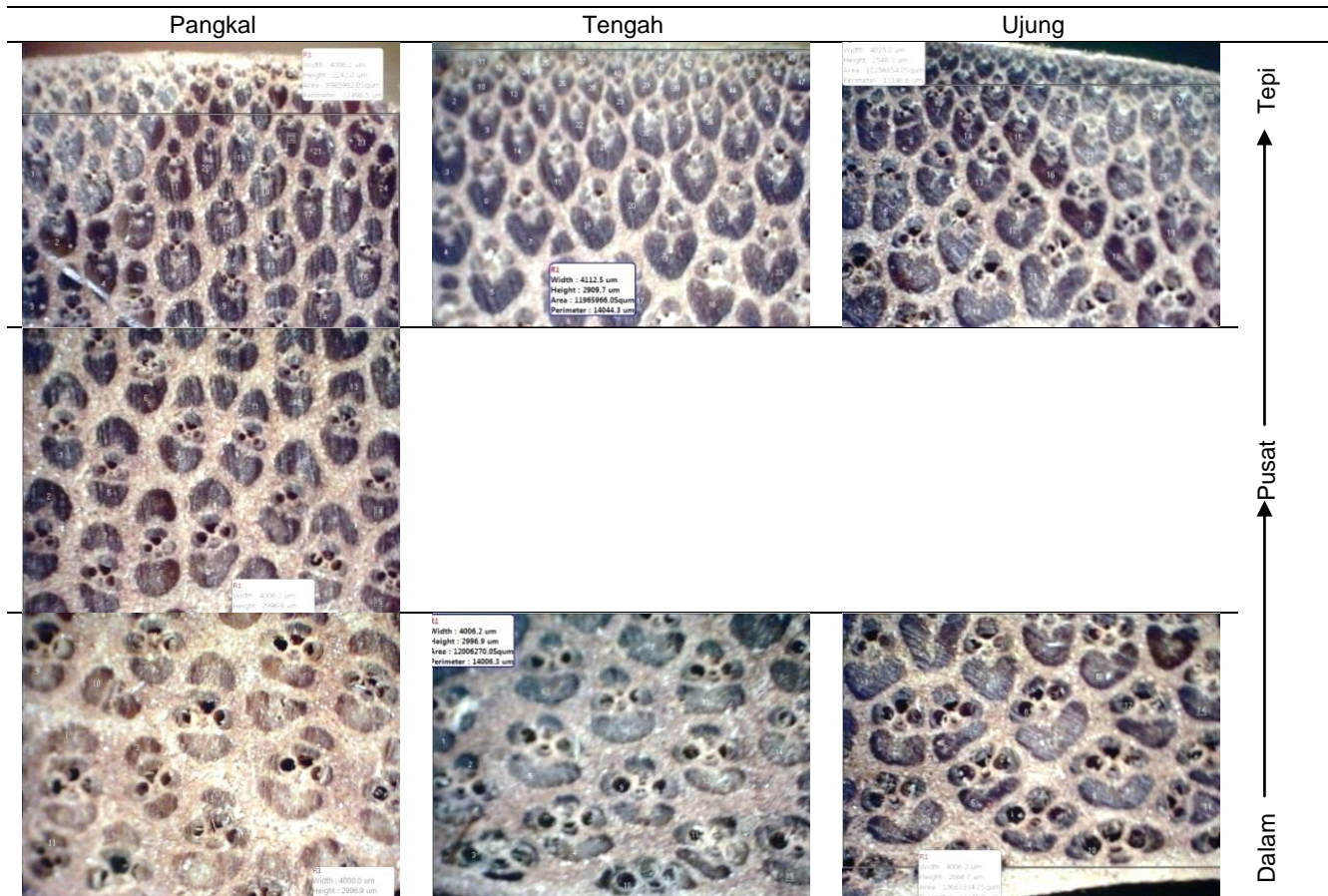
Secara umum terlihat bahwa jumlah ikatan pembuluh per satuan luas (selanjutnya disebut kerapatan ikatan pembuluh) pada ketiga jenis bambu menurun dari tepi ke dalam, tetapi ukuran luas setiap ikatan pembuluh semakin kecil. (Gambar 2, 3, dan 4). Ikatan pembuluh terdiri atas sel sklerenkim, metaxilem, protoxilem, dan floem. Dibandingkan ketiga jenis sel lainnya, sel sklerenkim yang dominan menyumbangkan kekuatan bilah bambu. Oleh karena sel sklerenkim terdapat pada ikatan pembuluh, maka jumlah sel sklerenkim pada setiap penampang bambu adalah sebanding dengan jumlah ikatan pembuluhnya. Selain ikatan pembuluh, bambu tersusun atas sel-sel parenkim yang bertindak sebagai jaringan dasarnya. Proporsi parenkim akan berbanding terbalik dengan kerapatan ikatan pembuluh. Sel parenkim berfungsi untuk menyimpan cadangan makanan berupa pati dan gula. Keberadaan pati dan gula cenderung menarik organisme perusak untuk bahan pakannya. Berkaitan dengan hal tersebut, kerapatan ikatan pembuluh yang lebih tinggi cenderung membuat bambu lebih kuat dan awet.

Kerapatan ikatan pembuluh (buah/mm^2) dihitung dengan cara membagi setiap foto mikroskop menjadi 5 bagian, lalu setiap bagian dihitung jumlahnya. Hasil pengamatan disajikan pada Gambar 5(a, b, c, dan d). Tiga buah fungsi regresi, yaitu linear, logaritmik, dan

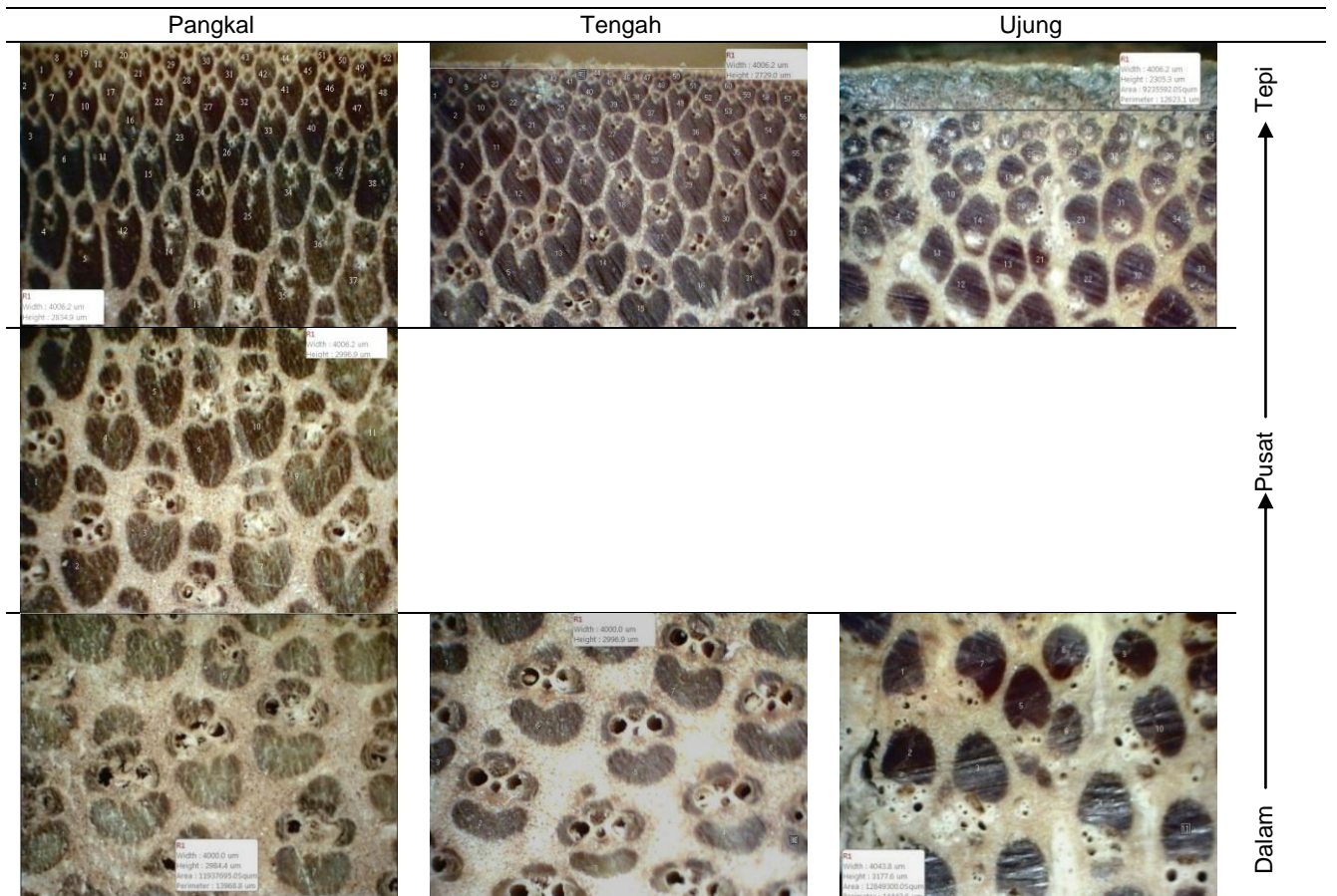
power dicoba untuk mengepas titik-titik data pada diagram kartesius (Tabel 1). Secara umum fungsi nonlinear lebih baik dalam mengepas kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai jarak dari tepi bambu. Namun, karena analisis mekanika menjadi lebih sederhana pada fungsi linear daripada fungsi nonlinear, maka regresi linear tetap dipertahankan. Khusus bambu andong (Gambar 5c dan d) tampak bahwa kerapatan ikatan pembuluh bagian ujung jauh lebih rendah daripada pangkal dan tengah pada kedalaman yang sama. Oleh karena itu, perlu dipisahkan bagian ujung dari 2 bagian yang lain. Gambar 5d menunjukkan plot dan garis regresi bambu andong yang telah dipisahkan bagian ujungnya, sedangkan garis regresi pada Gambar 5c menggunakan seluruh data.

Analisis Sifat Penampang Bilah Bambu

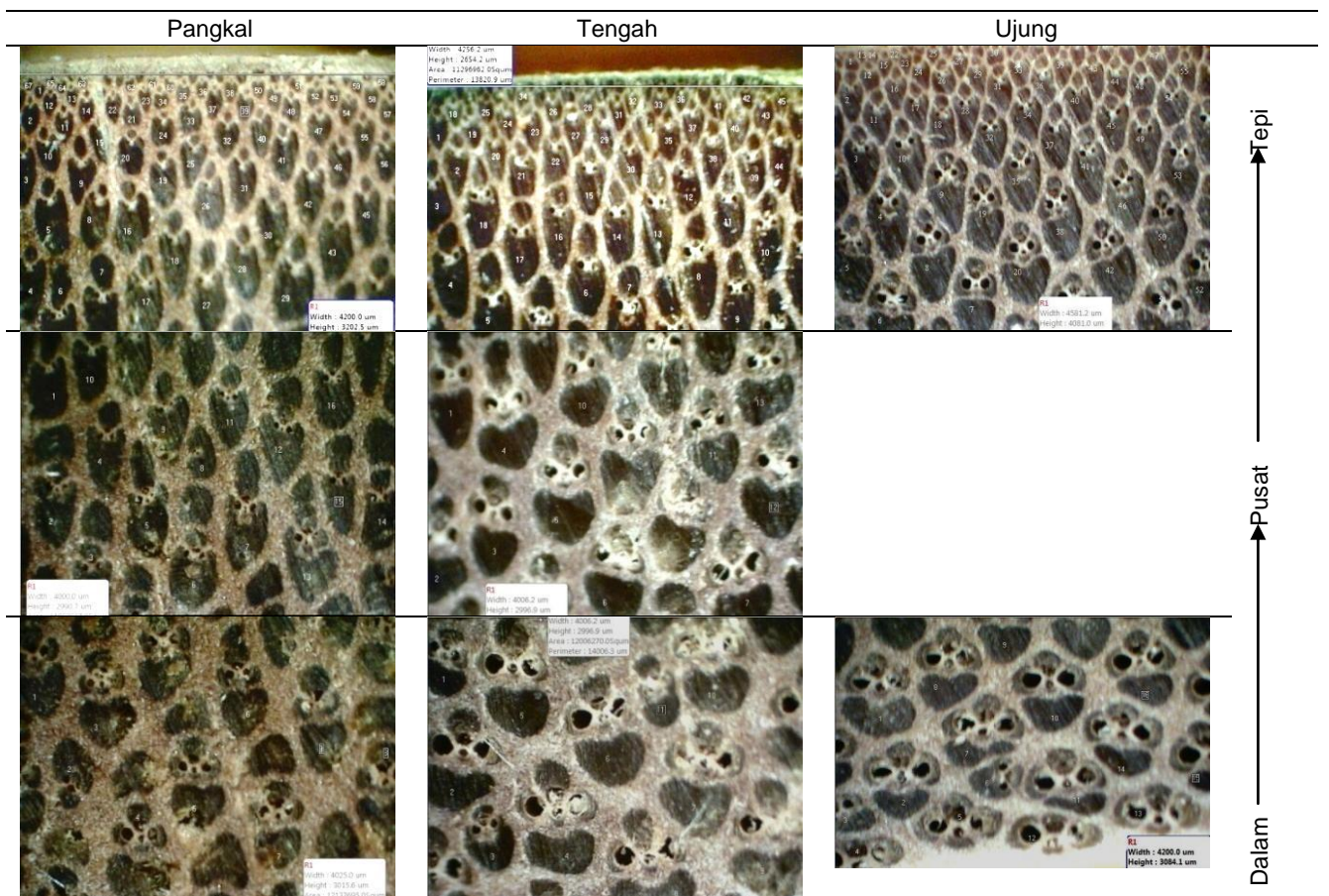
Metode TCC telah lazim digunakan secara luas untuk analisis material yang berlapis-lapis (*layered system*). Metode ini mentransformasi lebar penampang suatu material sesuai dengan nisbah modulus elastisitas (E)-nya. Material yang nilai E tinggi akan diperlebar, sedangkan yang E -nya rendah akan dipersempit sehingga akan terbangun bentuk geometri imajiner yang baru dan sama sekali berbeda dengan bentuk geometri aktualnya. Bentuk geometri imajiner ini sering pula disebut dengan penampang tertransformasi (*transformed cross section (TCC)*). Dengan asumsi bahwa nisbah E adalah ekuivalen



Gambar 2 Penampakan mikroskopis penampang melintang ruas bambu tali.



Gambar 3 Penampakan mikroskopis penampang melintang ruas bambu betung.



Gambar 4 Penampakan mikroskopis penampang melintang ruas bambu andong.

bentuk penampang tertransformasi tersebut dapat juga dibangun dari fungsi kerapatan ikatan pembuluh. Dengan demikian, ketiga model regresi (linear, logaritmik, dan power) dari kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai kedalaman dapat digunakan untuk membangun bentuk penampang tertransformasi dan melakukan analisis sifat penampangnya.

Model linear

Bambu setebal 15 mm dengan lebar 20 mm, bagian tepi dan dalamnya masing-masing disayat 2 dan 3 mm sehingga menghasilkan bilah bambu tanpa kulit dan tanpa matriks setebal 10 mm (Gambar 6a & b). Selanjutnya, apabila bagian pusat digunakan sebagai nilai standar, maka bagian dalam akan tertransformasi menjadi lebih sempit karena *E*-nya lebih kecil daripada bagian pusat, sebaliknya bagian tepi menjadi lebih lebar. Perubahan lebar ini sebanding dengan besarnya nisbah *E* suatu bagian dibandingkan bagian standar terpilih (dalam kasus ini dipilih pusat bambu sebagai standar). Oleh karena

nisbah *E* diasumsikan ekuivalen dengan nisbah kerapatan ikatan pembuluhnya maka penampang tertransformasi dapat dibangun dari persamaan berikut:

a. Bambu Tali:

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7,5)} = 20 \frac{-0,516y+6,221}{2,351} = - 4,39y + 52,92; \text{ untuk } 2 < y < 12 \dots\dots\dots(29)$$

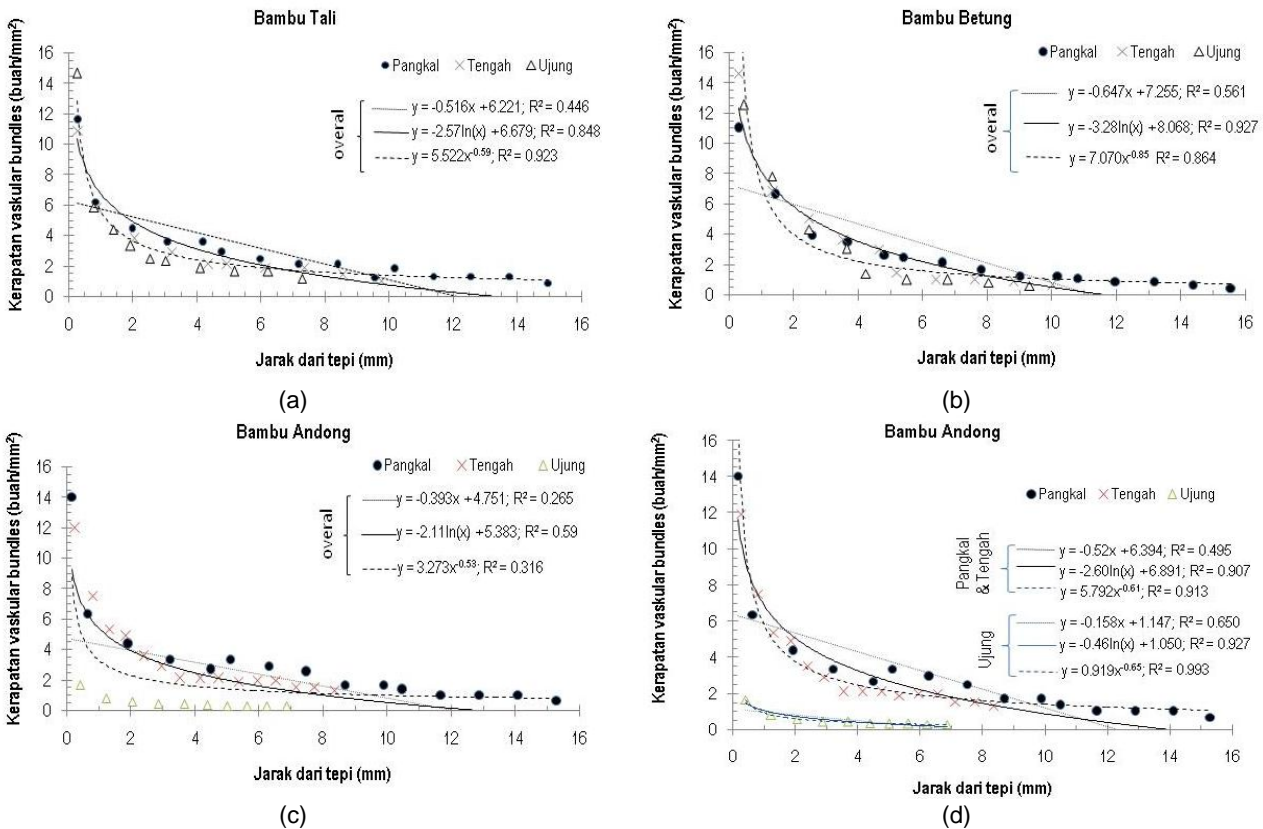
b. Bambu Betung:

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7,5)} = 20 \frac{-0,647y+7,255}{2,403} = - 5,386y + 60,395; \text{ untuk } 2 < y < 12 \dots\dots\dots(30)$$

c. Bambu Andong:

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7,5)} = 20 \frac{-0,393y+4,751}{1,804} = - 4,36y + 52,69; \text{ untuk } 2 < y < 12 \dots\dots\dots(31)$$

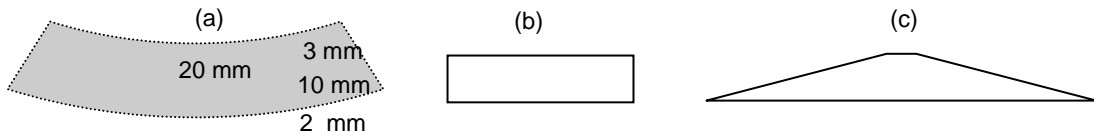
Sesuai dengan Persamaan 29–31 maka penampang tertransformasi berbentuk trapesium dengan tinggi 20 mm, dan panjang sisi atas dan bawah seperti tersaji pada Gambar 7. Khusus untuk bambu



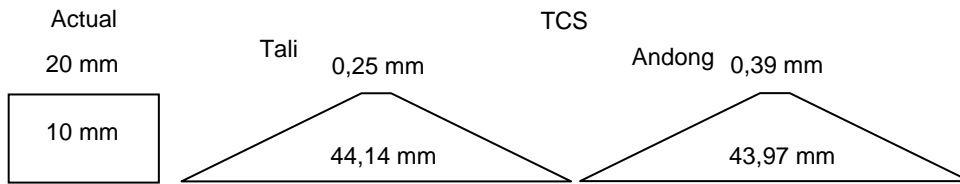
Gambar 5 Plot dan garis regresi kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai kedalaman pada: (a) bambu tali, (b) bambu betung, (c) bambu andong, dan (d) bambu andong terpisah ujungnya.

Tabel 1 Fungsi regresi linear, logaritmik, dan power untuk mengepas kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai kedalaman

Jenis bambu	Linear	Non-linear (logaritmik)	Non-linear (power)
Tali (semua)	$y = -0,516x + 6,221; R^2 = 0,446$	$y = -2,57\ln(x) + 6,679; R^2 = 0,848$	$y = 5,522x^{-0,59}; R^2 = 0,923$
Betung (semua)	$y = -0,647x + 7,255; R^2 = 0,561$	$y = -3,28\ln(x) + 8,068; R^2 = 0,927$	$y = 7,070x^{-0,85}; R^2 = 0,864$
Andong (semua)	$y = -0,393x + 4,751; R^2 = 0,265$	$y = -2,11\ln(x) + 5,383; R^2 = 0,59$	$y = 3,273x^{-0,53}; R^2 = 0,316$
Andong (pangkal+tengah)	$y = -0,52x + 6,394; R^2 = 0,495$	$y = -2,60\ln(x) + 6,891; R^2 = 0,907$	$y = 5,792x^{-0,61}; R^2 = 0,913$
Andong (ujung)	$y = -0,158x + 1,147; R^2 = 0,650$	$y = -0,46\ln(x) + 1,050; R^2 = 0,927$	$y = 0,919x^{-0,65}; R^2 = 0,993$



Gambar 6 (a) Asal bilah bambu, (b) penampang aktual, dan (c) penampang tertransformasi.



Gambar 7 Dimensi penampang aktual dan penampang tertransformasi model linear pada bambu tali dan andong.

betung pemilihan bilah standar, yaitu sejauh 7,5 mm dari tepi mengakibatkan panjang sisi atas bernilai negatif sehingga model linear tidak tepat diterapkan pada kasus bambu betung ini.

Untuk mendapatkan sifat-sifat penampang tertransformasi, bidang trapesium tersebut dibagi menjadi 3 bagian, yaitu 2 bidang segitiga siku-siku dan 1 bidang persegi empat. Posisi sentroid setiap bidang dapat dilihat pada Gambar 8. Selanjutnya, dengan menggunakan Persamaan 20 diperoleh sentroid penampang tertransformasi untuk bilah bambu tali dan bambu andong, berturut-turut adalah 3,35 dan 3,36 mm untuk bambu tali dan andong. Sementara itu, momen inersia pada sentroidnya dihitung melalui Persamaan 16 dan 17 yang dilanjutkan dengan persamaan 18. Hasil sifat-sifat penampang tertransformasi pada model linear disajikan pada Tabel 2.

Model nonlinear (logaritmik)

Pada model logaritmik, lebar penampang tertransformasi pada setiap lapisan dapat dinyatakan dengan:

$$b(y) = 20 \frac{f(y)}{f(7,5)}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(32)$$

Dengan demikian, untuk setiap bambu dapat dinyatakan dengan:

a. Bambu Tali:

$$b y = 20 \frac{-2,57 \ln y + 6,679}{-2,57 \ln 7,5 + 6,679} = -34,251 \ln y + 89,012; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(33)$$

b. Bambu Betung:

$$b y = 20 \frac{-3,28 \ln y + 8,068}{-3,28 \ln 7,5 + 8,068} = -44,959 \ln y + 110,587; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(34)$$

c. Bambu Andong:

$$b y = 20 \frac{-2,11 \ln y + 5,383}{-2,11 \ln 7,5 + 5,383} = -37,294 \ln y + 95,143; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(35)$$

Berdasarkan Persamaan 33, 34, dan 35, dimensi dan bentuk penampang tertransformasi bilah bambu disajikan pada Gambar 9.

Untuk melakukan analisis penampang, diperlukan model diferensial seperti Gambar 10. Seperti terlihat pada gambar, daerah yang diarsir diasumsikan berbentuk persegi empat karena dia sangatlah kecil.

Dengan demikian luas penampang tertransformasi dapat dinyatakan dengan:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} b y dy \dots\dots\dots(36)$$

Jadi, untuk setiap bambu, luas area tertransformasinya adalah

a. Bambu Tali:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -34,251 \ln y + 89,012 dy \dots\dots\dots(37)$$

Yang dapat diselesaikan menjadi:

$$A_{tcs} = -34,251 y \ln y + 123,236 y \frac{12}{2} = 258,786 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(38)$$

b. Bambu Betung:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -44,959 \ln y + 110,587 dy \dots\dots\dots(39)$$

$$A_{tcs} = -44,959 y \ln y + 155,546 y \frac{12}{2} = 277,159 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(40)$$

c. Bambu Andong:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -37,294 \ln y + 95,143 dy \dots\dots\dots(41)$$

$$A_{tcs} = -37,294 y \ln y + 132,437 y \frac{12}{2} = 264,005 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(42)$$

Selanjutnya momen pertama penampang dapat dinyatakan dengan:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} y b y dy \dots\dots\dots(43)$$

Oleh karena itu, setiap bambu mempunyai momen pertama penampang sebagai berikut:

a. Bambu Tali:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} -34,251 \ln y + 89,012 y dy \dots\dots\dots(44)$$

$$Q_{tcs} = -17,1255 y^2 \ln(y) + 53,06875 y^2 \frac{12}{2} = 1349,148257 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(45)$$

b. Bambu Betung:

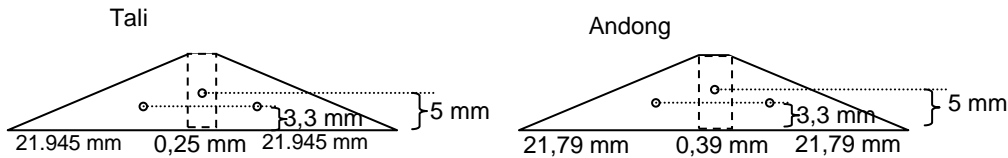
$$Q_{tcs} = \int_2^{12} -44,959 \ln y + 110,587 y dy \dots\dots\dots(46)$$

$$Q_{tcs} = -22,4795 y^2 \ln(y) + 66,53325 y^2 \frac{12}{2} = 1333,219307 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(47)$$

c. Bambu Andong:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} -37,294 \ln y + 95,143 y dy \dots\dots\dots(48)$$

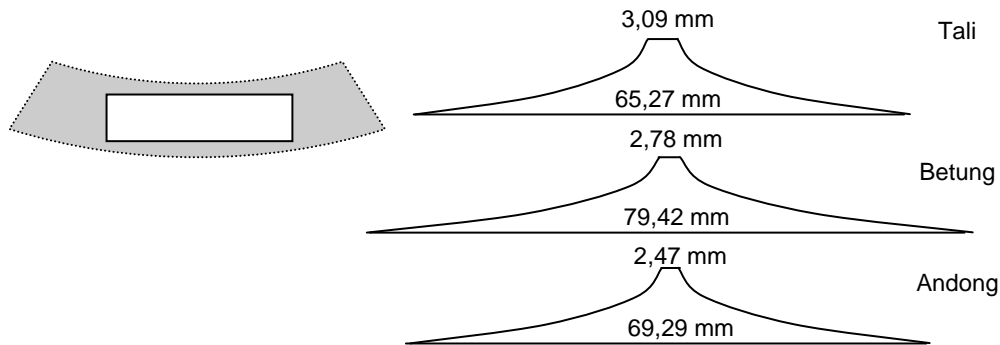
$$Q_{tcs} = -18,647 y^2 \ln(y) + 56,895 y^2 \frac{12}{2} = 1344,608643 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(49)$$



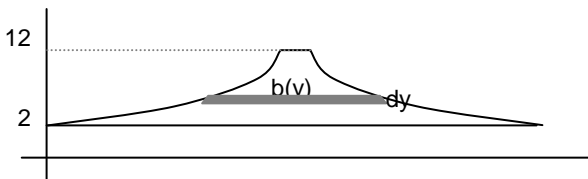
Gambar 8 Posisi sentroid penampang untuk bagian-bagian bidang penampang tertransformasi (segitiga dan persegi empat).

Tabel 2 Sifat-sifat penampang bambu tali dan andong dengan model transformasi linear

	Tali	Andong
Luas penampang (A)	221,95 mm ²	221,8 mm ²
Sentroid (y)	3.3521 mm	3.3626 mm
Momen inersia pada sentroid	1246,87 mm ⁴	1253.643 mm ⁴



Gambar 9 Bentuk dan dimensi penampang tertransformasi logaritmik bambu tali, betung, dan andong.



Gambar 10 Sketsa pemodelan logaritmik untuk analisis sifat penampang.

Jadi, sentroid ditinjau dari sumbu x adalah:

a. Bambu Tali:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1349.148257}{258.786} = 5.213 \text{ mm} \dots\dots\dots(50)$$

b. Bambu Betung:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1333.219307}{277.159} = 4.810 \text{ mm} \dots\dots\dots(51)$$

c. Bambu Andong:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1344.608643}{264.005} = 5.093 \text{ mm} \dots\dots\dots(52)$$

Bila ditinjau dari alas penampang tertransformasi maka sentroid (y) berjarak sejauh 3,21, 2,81, dan 3,09 mm berturut-turut untuk bambu tali, betung, dan andong.

Selanjutnya, momen inersia pada sumbu x dapat dihitung dengan rumus:

$$I_x = \int y^2 b(y) dy \dots\dots\dots(53)$$

maka untuk setiap bambu dapat diperoleh:

a. Bambu Tali:

$$I_x = \int_2^{12} y^2 -34.251 \ln y + 89.012 dy \dots\dots\dots(54)$$

$$I_x = -11.417 y^3 \ln(y) + 33.4763 y^3 \Big|_2^{12} = 8618.933 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(55)$$

b. Bambu Betung:

$$I_x = \int_2^{12} y^2 -44.959 \ln y + 110.587 dy \dots\dots\dots(56)$$

$$I_x = -14.9863 y^3 \ln(y) + 41.858 y^3 \Big|_2^{12} = 7728.382848 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(57)$$

c. Bambu Andong:

$$I_x = \int_2^{12} y^2 -37.294 \ln y + 95.143 dy \dots\dots\dots(58)$$

$$I_x = -12.4313 y^3 \ln(y) + 35.858 y^3 \Big|_2^{12} = 8365.750508 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(59)$$

Selanjutnya momen inersia pada sentroid dapat diperoleh dari teorema sumbu sejajar:

a. Bambu Tali:

$$I_{xc} = 8618.932931 - 5.213^2 \times 258.786 = 1586,33 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(60)$$

b. Bambu Betung:

$$I_{xc} = 7728.382848 - 4.810^2 \times 277.159 = 1316,01 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(61)$$

c. Bambu Andong:

$$I_{xc} = 8365.750508 - 5.093^2 \times 264.005 = 1517,82 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(62)$$

Model nonlinear (Power)

Pada model power, lebar penampang tertransformasi pada setiap bagian dapat dinyatakan dengan:

$$b(y) = 20 \frac{f(y)}{f(7,5)}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(63)$$

Dengan demikian, setiap bambu dapat dinyatakan dengan:

a. Bambu Tali:

$$b y = 20 \frac{5.522y^{0.59}}{5.522 \cdot 7.5^{-0.59}} = 65.6623y^{0.59}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(64)$$

b. Bambu Betung:

$$b y = \frac{7.070y^{0.85}}{7.070 \cdot 7.5^{-0.85}} = 110.8746y^{0.85}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(65)$$

c. Bambu Andong :

$$b y = \frac{3.273y^{0.53}}{3.273 \cdot 7.5^{-0.53}} = 58.18519y^{0.53}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \dots\dots\dots(66)$$

Berdasarkan Persamaan 64, 65, dan 66, dapat dibangun bentuk penampang tertransformasi seperti pada Gambar 11. Selanjutnya model sketsa gambar model diferensialnya disajikan pada Gambar 12.

Seperti terlihat pada Gambar 12, luas penampang tertransformasi dapat dinyatakan dengan:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} b y dy \dots\dots\dots(67)$$

Luas area tertransformasi setiap bambu, luas area nya adalah:

a. Bambu Tali:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} 65.6623 y^{0.59} dy \dots\dots\dots(68)$$

Yang dapat diselesaikan menjadi:

$$A_{tcs} = 160.152 y^{0.41} \Big|_2^{12} = 230.813 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(69)$$

b. Bambu Betung:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} 110.8746 y^{0.85} dy \dots\dots\dots(70)$$

$$A_{tcs} = 739.164 y^{0.15} \Big|_2^{12} = 252.891 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(71)$$

c. Bambu Andong:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} 58.18519 y^{0.53} dy \dots\dots\dots(72)$$

$$A_{tcs} = 123.798 y^{0.47} \Big|_2^{12} = 226.569 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots(73)$$

Momen pertama penampang dapat dinyatakan dengan:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} y b y dy \dots\dots\dots(74)$$

Momen pertama penampang setiap bambu adalah:

a. Bambu Tali:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} 65.6623 y^{0.59} y dy \dots\dots\dots(75)$$

$$Q_{tcs} = 46.569 y^{1.41} \Big|_2^{12} = 1424.1475 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(76)$$

b. Bambu Betung:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} 110.8746 y^{0.85} y dy \dots\dots\dots(77)$$

$$Q_{tcs} = 96.412 y^{1.15} \Big|_2^{12} = 1465.596 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(78)$$

c. Bambu Andong:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} 58.18519 y^{0.53} y dy \dots\dots\dots(79)$$

$$Q_{tcs} = 39.582 y^{1.47} \Big|_2^{12} = 1417.534516 \text{ mm}^3 \dots\dots\dots(80)$$

Sentroid ditinjau dari sumbu x adalah:

a. Bambu Tali:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1424.1475}{230.813} = 6,17 \text{ mm} \dots\dots\dots(81)$$

b. Bambu Betung:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1465.596}{252.891} = 5.795 \text{ mm} \dots\dots\dots(82)$$

c. Bambu Andong:

$$y = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1417.534516}{226.569} = 5.605 \text{ mm} \dots\dots\dots(83)$$

Sentroid ditinjau dari alas penampang adalah 4,17, 3,80, dan 3,61 mm masing-masing untuk bambu tali, betung, dan andong.

Momen inersia pada sumbu x untuk setiap bambu dapat diperoleh:

a. Bambu Tali:

$$I_x = \int_2^{12} y^2 65.6623 y^{0.59} dy \dots\dots\dots(84)$$

$$I_x = 27.246 y^{2.41} \Big|_2^{12} = 10722.601 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(85)$$

b. Bambu Betung:

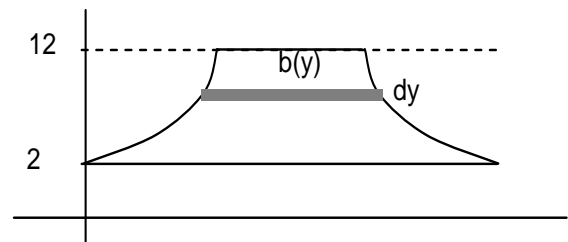
$$I_x = \int_2^{12} y^2 110.8746 y^{0.85} dy \dots\dots\dots(86)$$

$$I_x = 51.570 y^{2.15} \Big|_2^{12} = 10551.48039 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(87)$$

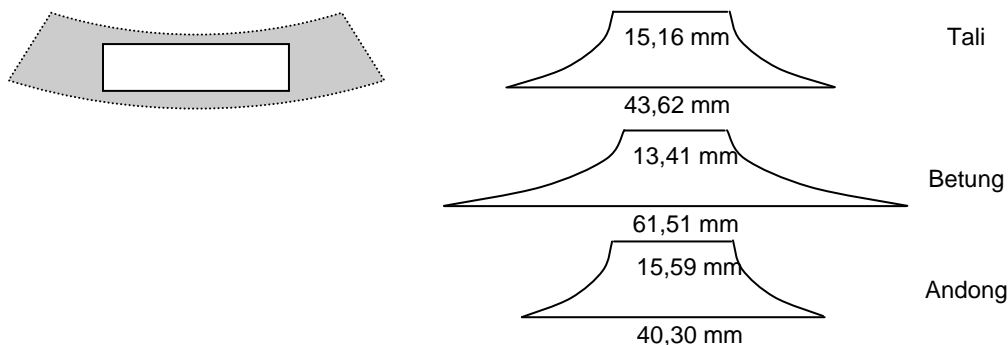
c. Bambu Andong:

$$I_x = \int_2^{12} y^2 58.18519 y^{0.53} dy \dots\dots\dots(88)$$

$$I_x = 23.557 y^{2.47} \Big|_2^{12} = 10776.18057 \text{ mm}^4 \dots\dots\dots(89)$$



Gambar 12 Sketsa pemodelan power untuk analisis sifat penampang bambu.



Gambar 11 Bentuk dan dimensi penampang tertransformasi power bambu tali, betung, dan andong.

Momen inersia pada sentroidnya adalah:

a. Bambu Tali:
 $I_{xc} = 10722.601 - 6,17^2 \times 230.813 = 1935,80 \text{ mm}^4$(90)

b. Bambu Betung:
 $I_{xc} = 10551.48039 - 5.795^2 \times 252.891 = 2058,89 \text{ mm}^4$(91)

c. Bambu Andong:
 $I_{xc} = 10776.18057 - 5.605^2 \times 226.569 = 3658.283 \text{ mm}^4$(92)

Sifat-sifat penampang tertransformasi power dari setiap bilah bambu dapat dilihat dalam Tabel 4.

Analisis Sifat Penampang Bambu Laminasi 2-Lapis

1 Model linear Konfigurasi Luar-Dalam (LD)

Pada model linear, bambu laminasi 2-lapis dapat

dilustrasikan seperti pada Gambar 13.

Penentuan centroid penampang tertransformasi, dibagi menjadi 5 bagian, yaitu A, B, C, D, dan E (Gambar 14) sehingga sentroid setiap bagian dapat ditentukan dengan:

- 1 Bidang A, B, C, dan D berbentuk segitiga sehingga sentroidnya adalah 1/3 tingginya;
- 2 Bidang E adalah persegi panjang sehingga sentroidnya adalah 1/2 tingginya.

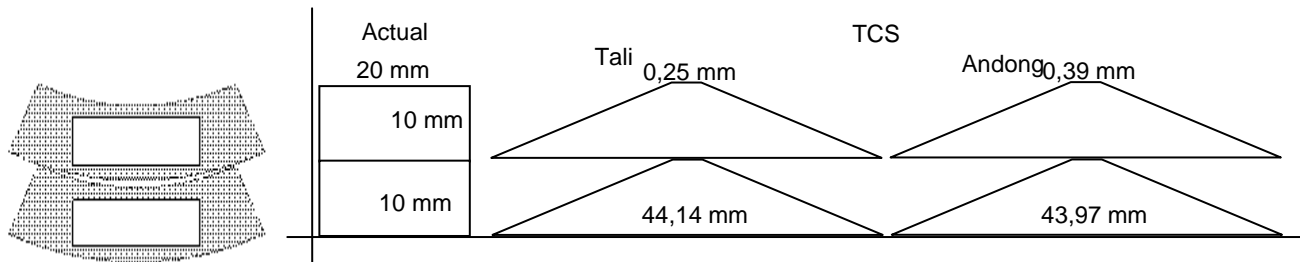
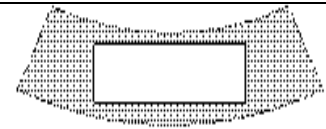
Sentroid setiap bidang bila ditinjau dari sumbu x pada diagram kartesius seperti tersaji pada Gambar 14.

Sentroid penampang tertransformasi ditinjau dari sumbu x dapat dihitung dengan persamaan 18, dan menghasilkan nilai masing-masing 8,38 dan 8,36 mm untuk bambu tali dan andong. Oleh karena sumbu x berimpit dengan alas bidang tertransformasi, maka nilai sentroid tersebut adalah identik dengan sentroid yang ditinjau dari alasnya (Gambar 15).

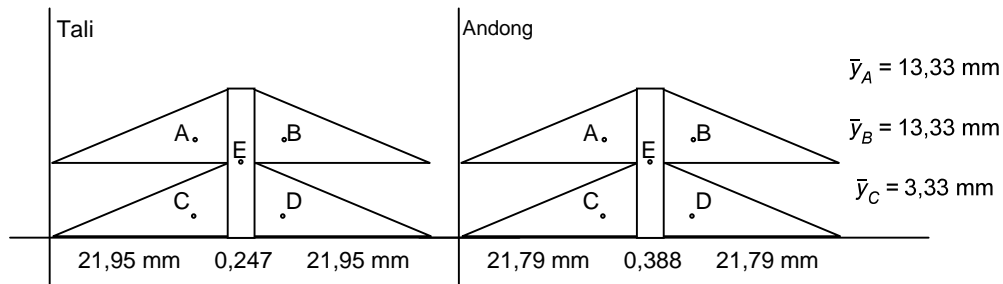
Gambar 15 selanjutnya dapat digunakan untuk

Tabel 4 Sifat-sifat penampang bambu tali dan andong dengan model transformasi power

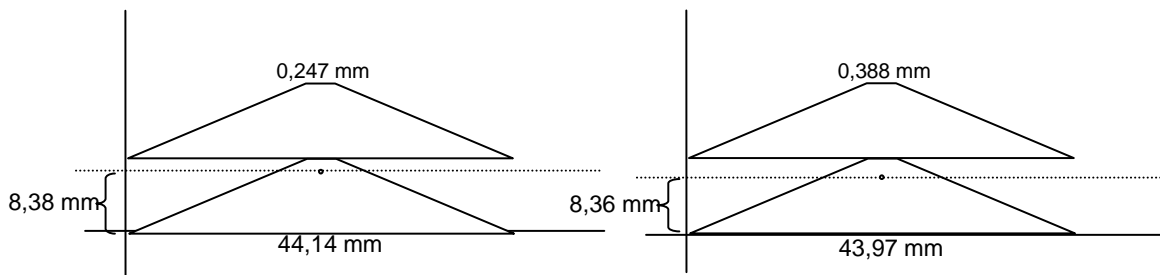
	Tali	Betung	Andong
Luas penampang (A)	230.813 mm ²	252.891 mm ²	226.569 mm ²
Sentroid (y)	4,17 mm	3.795 mm	3.605 mm
Momen inersia pada sentroid	1935.804 mm ⁴	2058.889 mm ⁴	3658.283 mm ⁴



Gambar 13 Ilustrasi penampang tertransformasi model linear dari bambu laminasi 2-lapis konfigurasi luar-dalam.



Gambar 14 Ilustrasi posisi sentroid setiap bagian penampang tertransformasi konfigurasi luar-dalam.



Gambar 15 Ilustrasi posisi sentroid penampang tertransformasi linear konfigurasi luar-dalam.

menghitung momen inersia penampang tertransformasi, yaitu

1 Untuk penampang segitiga, momen inersia pada sumbu yang berimpit dengan alasnya (I_x) adalah

$$I_x = \frac{bh^3}{12}; \text{ sehingga pada sentroidnya adalah :}$$

$$I_{xc} = \frac{bh^3}{12} - y^2A = \frac{bh^3}{36}$$

2 Untuk penampang persegi panjang, momen inersia pada sumbu yang berimpit dengan alasnya (I_x) adalah $I_x = \frac{bh^3}{3}$; sehingga pada sentroidnya

$$\text{adalah : } I_{xc} = \frac{bh^3}{3} - y^2A = \frac{bh^3}{12}$$

Selanjutnya, dengan menggunakan teorema sumbu sejajar, maka momen inersia penampang tertransformasi dapat dihitung dengan Persamaan 18, sehingga diperoleh nilai sebesar 13591,02 dan 13596,64 mm⁴.

Modulus elastisitas efektif dapat dihitung sebagai:

$$E_{ef} = \frac{E_{tcs} I_{tcs}}{I_{ac}} \dots \dots \dots (93)$$

yaitu

- E_{ef} : Modulus elastisitas efektif
- I_{ac} : Momen inersia efektif (yaitu penampang aktual)
- E_{tcs} : Modulus elastisitas TCS (yaitu pada *laminae* terpilih sebagai standar)
- I_{tcs} : Momen inersia TCS (yaitu penampang tertransformasi)

Setiap bambu memiliki nisbah E efektif dibanding E standar (yaitu nilai E pada pusat bambu) yang dapat dihitung sebagai berikut:

1 Tali : $\frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{13591,02}{13333,33} \times 100\% = 101,932\% \dots (94)$

2 Andong : $\frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{13596,64}{13333,33} \times 100\% = 101,975\% \dots (95)$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat diperoleh bahwa modulus elastisitas bambu laminasi 2-lapis dengan konfigurasi luar-dalam akan diperoleh nilai MOE efektif yang 1,9% lebih tinggi daripada MOE bambu bagian pusat.

Konfigurasi Luar-Luar (LL)

Analisis TCS dengan model linear untuk bambu laminasi 2-lapis konfigurasi luar-luar (LL) diilustrasikan seperti pada Gambar 16, sedangkan sentroid setiap bagian disajikan pada Gambar 17.

Penampang tertransformasi berbentuk simetris, maka sentroid terletak tepat di tengah, yaitu sejauh 10 mm dari sumbu x, sehingga momen inersianya adalah 22112,5 dan 22049,72 mm⁴ masing-masing untuk bambu tali dan andong. Selanjutnya nisbah E efektif terhadap E standar adalah:

1 Tali : $\frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{22112,58}{13333,33} \times 100\% = 165,84\% \dots (96)$

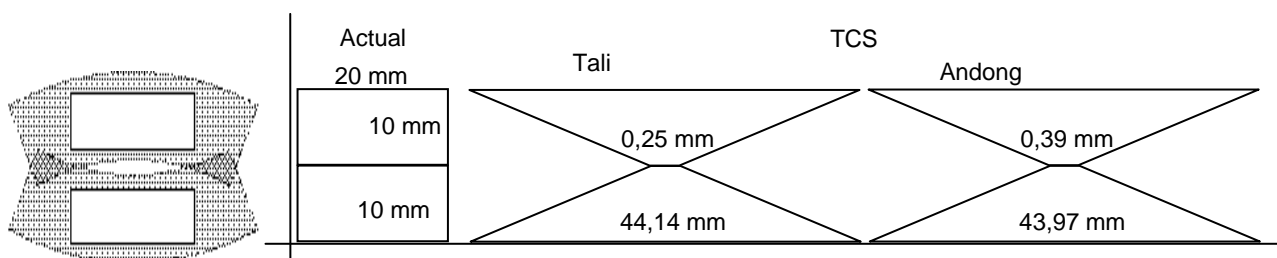
2 Andong : $\frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{22049,72}{13333,33} \times 100\% = 165,37\% \dots (97)$

Apabila konfigurasi luar-luar yang digunakan untuk membuat bambu laminasi 2-lapis, maka bambu laminasinya akan memiliki MOE 65% lebih tinggi daripada bilah bambu bagian pusat.

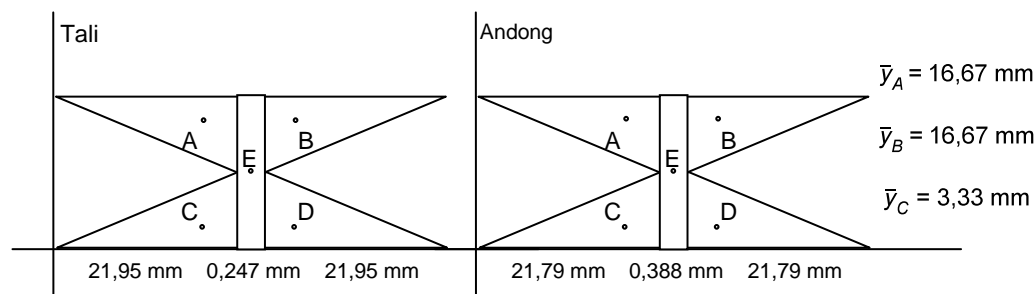
Konfigurasi Dalam-Dalam (DD)

Analisis TCS dengan model linear untuk bambu laminasi 2-lapis konfigurasi dalam-dalam (DD) diilustrasikan seperti pada Gambar 18, sedangkan sentroid setiap bagian disajikan pada Gambar 19.

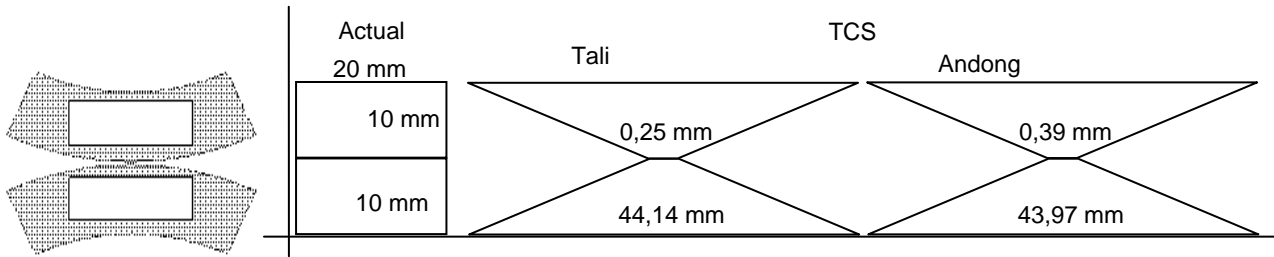
Serupa dengan konfigurasi luar-luar (LL), konfigurasi dalam-dalam (DD) berbentuk simetris sehingga sentroidnya juga terletak di tengah (10 cm dari sumbu x. Momen inersia penampang pada Gambar 19 adalah 7480,50 dan 7522,41 mm⁴ untuk bambu tali dan andong, dan efisiensinya dapat



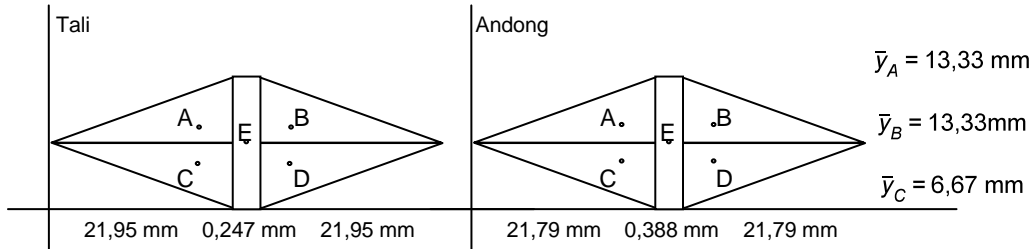
Gambar 16 Ilustrasi penampang tertransformasi model linear dari bambu laminasi 2-lapis konfigurasi luar-luar.



Gambar 17 Ilustrasi posisi sentroid masing-masing bagian penampang tertransformasi konfigurasi luar-luar.



Gambar 18 Ilustrasi penampang tertransformasi model linear dari bambu laminasi 2-lapis konfigurasi dalam-dalam.



Gambar 19 Ilustrasi posisi sentroid masing-masing bagian penampang tertransformasi konfigurasi dalam-dalam.

dihitung:

$$1 \text{ Tali} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{7480,50}{13333,33} \times 100\% = 56,42\% \dots (98)$$

$$2 \text{ Andong} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{7522,41}{13333,33} \times 100\% = 56,10\% \dots (99)$$

Jika konfigurasi dalam-dalam yang digunakan untuk membuat bambu laminasi 2-lapis maka bambu laminasinya akan memiliki MOE 43% lebih rendah daripada MOE bilah bambu bagian pusat. Secara ringkas, sifat-sifat penampang tertransformasi linear dan efisiensinya, dapat dilihat pada Tabel 4.

Model Nonlinear (Logaritmik dan Power)

Berdasarkan sifat-sifat penampang pada model logaritmik dapat diturunkan sifat mekanis bambu laminasi 2-lapis dengan susunan luar-dalam, luar-luar, dan dalam-dalam yang diilustrasikan pada Gambar 20 a, b, dan c, sedangkan untuk model power diilustrasikan pada Gambar 21. Sifat-sifat setiap bidang pada Gambar 20 dan 21 dapat dihitung dengan Persamaan 19–22, dan menghasilkan nilai-nilai sebagaimana tersaji pada Tabel 5.

Efisiensi Teoretis Bambu Laminasi 2-lapis

Sesuai dengan Tabel 4 dan 5, 3 macam konfigurasi bambu laminasi 2-lapis memiliki efisiensi yang berbeda-beda (Gambar 20). Konfigurasi luar-luar (LL) merupakan pilihan yang paling efisien sedangkan konfigurasi dalam-dalam (DD) adalah yang paling tidak efisien. Pada konfigurasi LL, lapisan bambu yang paling kaku terletak jauh dari garis netral sehingga memberikan tahanan yang lebih tinggi terhadap perubahan bentuk. Nilai kekakuan yang tinggi pada bagian luar ini ditunjukkan oleh tingginya nilai kerapatan ikatan pembuluh. Sebaliknya, konfigurasi DD adalah yang paling tidak kaku karena lapisan terkaku terletak di dekat garis netral, padahal tegangan normal di garis netral adalah nol sehingga bagian tersebut tidak memerlukan tahanan material

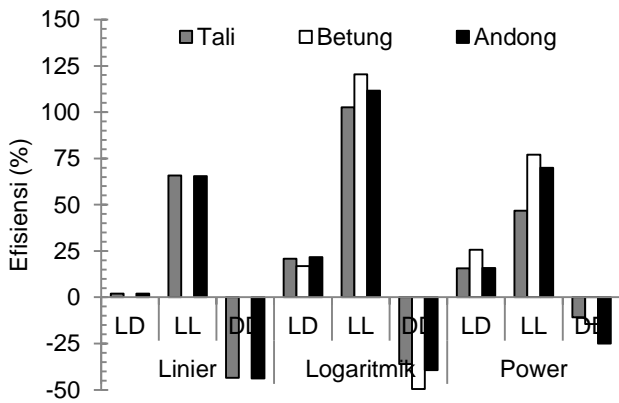
Tabel 4 Ringkasan sifat-sifat penampang tertansformasi linear bambu dan efisiensinya

Jenis bambu	Model transformasi linear		
Tali	$y = -0,516x + 6.221; R^2 = 0,446$		
Betung	$y = -0,647x + 7.255; R^2 = 0,561$		
Andong	$y = -0,393x + 4.751; R^2 = 0,265$		
Bambu laminasi 2-lapis	LD	LL	DD
Centroid			
Tali	8,38	10	10
Betung	-	-	-
Andong	8,36	10	10
Momen inersia			
Tali	13591	22113	7480
Betung	-	-	-
Andong	13597	13597	7522
Nisbah (E_{eff}/E_{tcs}) (%)			
Tali	101,93	165,84	56,42
Betung	-	-	-
Andong	101,98	165,37	56,10
Efisiensi (%)			
Tali	1,93	65,84	-43,58
Betung	-	-	-
Andong	1,98	65,37	-43,9

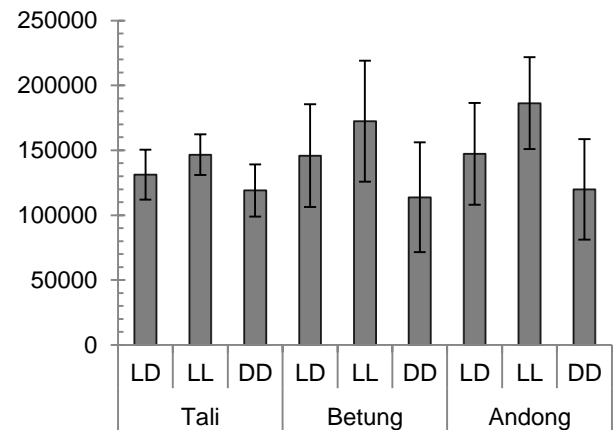
yang tinggi. Efisiensi tinggi diperoleh apabila bahan yang paling kaku diletakkan pada posisi menerima tegangan normal yang tinggi pula, sedangkan yang paling lentur pada posisi tegangan normal paling rendah.

Pengujian Empiris Bambu Laminasi 2-Lapis

Pengujian empiris di laboratorium menghasilkan modulus elastisitas sebagaimana disajikan pada Gambar 21. Pada grafik tersebut terlihat bahwa konfigurasi dalam-dalam (DD) pada bambu laminasi 2-lapis merupakan yang paling lentur dibandingkan dua konfigurasi lainnya. Sebaliknya, konfigurasi luar-luar (LL) merupakan yang paling kaku. Namun, tingginya keragaman pada sampel uji menyebabkan perbedaan tersebut tidak tampak nyata yang ditunjukkan terdapatnya selang nilai yang beririsan.



Gambar 20 Efisiensi teoretis bambu laminasi 2-lapis dibandingkan bilah bambu bagian pusat.



Gambar 21 Hasil pengujian lentur bambu laminasi 2-lapis.

Tabel 5 Ringkasan sifat-sifat penampang tertransformasi nonlinear bambu dan efisiensinya

Jenis bambu	Model transformasi logaritmik			Model transformasi power		
Tali	$y = -2,57\ln(x) + 6.679; R^2 = 0,848$			$y = 5.522x^{0,59}; R^2 = 0,923$		
Betung	$y = -3,28\ln(x) + 8.068; R^2 = 0,927$			$y = 7.070x^{0,85}; R^2 = 0,864$		
Andong	$y = -2,11\ln(x) + 5.383; R^2 = 0,59$			$y = 3.273x^{0,53}; R^2 = 0,316$		
Konfigurasi bambu laminasi	LD	LL	DD	LD	LL	DD
Sentroid						
Tali	8,21	10	10	9,17	10	10
Betung	7,81	10	10	8,80	10	10
Andong	8,09	10	10	8,61	10	10
Momen inersia						
Tali	16112	27014	8516	15412	19562	11898
Betung	15571	29388	6719	16767	23598	11404
Andong	16236	28225	8087	15446	22649	10006
Nisbah (E_{eff}/E_{tcs}) (%)						
Tali	120,84	202,60	63,87	115,59	146,71	89,24
Betung	116,79	220,41	50,39	125,75	176,99	85,54
Andong	121,77	211,69	60,65	115,85	169,87	75,05
Efisiensi (%)						
Tali	20,84	102,6	-36,13	15,59	46,71	-10,76
Betung	16,79	120,41	-49,61	25,75	76,99	-14,47
Andong	21,77	111,69	-39,35	15,85	69,87	-24,95

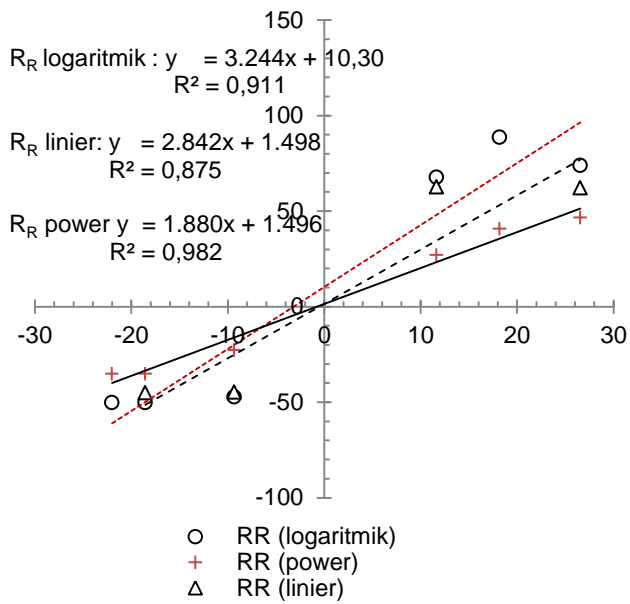
Tabel 6 Hasil uji t-student untuk validasi empiris hasil teoritis dibandingkan data empiris

	R_E	R_R (linear)	R_E	R_R (logaritmik)	R_E	R_R (power)
Mean	2,57	8,81	1,07	13,78	1,07	3,51
Variance	415,34	3834,14	416,02	4804,83	416,02	1497,16
Observations	4	4	6	6	6	6
Pearson correlation	0,9356		0,9546		0,9912	
Hypothesized mean difference	0		0		0	
df	3		5		5	
t Stat	-0,2870		-0,6200		-0,3200	
P(T<=t) one-tail	0,3964		0,2812		0,3810	
t Critical one-tail	2.3534		2.0150		2.0150	
P(T<=t) two-tail	0,7928		0,5624		0,7619	
t Critical two-tail	3.1824		2.5706		2.5706	

Validasi Teoretis dengan Hasil Empiris

Seperti disajikan pada Tabel 6, hasil teoritis baik transformasi linear, logaritmik, dan power masing-masing memiliki nilai korelasi Pearson yang sangat tinggi sehingga terdapat hubungan linear yang cukup baik antara hasil teori dan empiris (Gambar 22). Uji t-

student data berpasangan juga menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan antara hasil teori dan empiris. Ditinjau dari nilai signifikansinya, dapat dilihat bahwa transformasi power merupakan model yang paling mendekati nilai empiris dibanding 2 model transformasi lainnya.



Gambar 22 Regresi linear validasi hasil teoretis model transformasi linear, logaritmik, dan power terhadap data empirisnya.

KESIMPULAN

Kerapatan ikatan pembuluh bambu bergradasi dari tepi hingga ke dalam sehingga dapat diturunkan fungsi linear dan nonlinear sebagai pendekatan

matematikanya. Nisbah kerapatan ikatan pembukuh *bundles* dapat digunakan sebagai pengganti nisbah modulus elastisitas dalam metode *transformed cross section* (TCC) karena hasil teoretis dari model yang diturunkan ternyata tidak berbeda dengan nilai empirisnya. Model transformasi terbaik adalah power karena nilainya paling mendekati hasil empirisnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Andre JP. 1998. A Study of the Vascular Organization of Bamboos (*Poaceae-bambusae*) Using Microcasting Method. *IAWA J.* 19(3): 265–278.
- Li HB, Shen SP. 2011. The mechanical properties of bamboo and vascular bundles. *J Mater Res.* 26(21): 2749–2756.
- Mustafa MT, Wahab R, Sudin M, Sulaiman O, Kamal NAM, Khalid I. 2011. Anatomical and microstructures features of tropical bamboo *Gigantochloa brang*, *G. levis*, *G. scotechinii* and *G. wrayi*, *International J For, Soil Eros.* 1(1): 25–35.
- Ray AK, Mondal S, Das SK, Ramanchandrararo P. 2005. Bamboo - A functionally graded composite-correlation between microstructure and mechanical strength. *J. Mater Sci.* 40 (19): 5249–5253.