

## Rasio Ikatan Pembuluh sebagai Substitusi Rasio Modulus Elastisitas pada Analisa Layer System pada Bilah Bambu dan Bambu Laminasi

**Effendi Tri Bahtiar**

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor, Jawa Barat, 16680  
E-mail: bahtiar\_et@yahoo.com

**Naresworo Nugroho**

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor, Jawa Barat, 16680  
E-mail: naresworo@yahoo.com

**Surjono Surjokusumo**

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor, Jawa Barat, 16680  
E-mail: tunangan@hotmail.com

**Lina Karlinasari**

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor, Jawa Barat, 16680  
E-mail: l\_karlinasari@yahoo.com

**Atmawi Darwis**

Kelompok Keahlian Teknologi Kehutanan, Sekolah Tinggi Ilmu Hayati, Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesa 10, Bandung, Jawa Barat, 40132, E-mail: atmawi@sith.itb.ac.id

### Abstrak

Anatomi bambu disusun oleh sel-sel yang heterogen. Komponen anatomi bambu yang memberikan sumbangan terbesar pada sifat mekanisnya adalah ikatan pembuluh, sehingga kerapatan ikatan pembuluh dapat digunakan sebagai variabel dasar untuk menganalisa sifat mekanis bambu. Kerapatan ikatan pembuluh bergradasi dari tepi hingga ke dalam bambu sehingga dapat diturunkan suatu fungsi linier ataupun non linier sebagai pendekatannya. Rasio modulus elastisitas ( $E$ ) yang lazim digunakan pada metode transformed cross section, pada penelitian ini dicoba diganti dengan rasio ikatan pembuluh dengan asumsi bahwa keduanya adalah ekuivalen. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa terdapat nilai korelasi Pearson yang tinggi antara hasil teoritis dan hasil empiris, sedangkan hasil uji t-student data berpasangan menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara keduanya. Dengan demikian model transformasi yang diturunkan dapat digunakan untuk melakukan analisa layer system pada bilah bambu maupun bambu laminasi dengan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan. Dari ketiga model transformasi terpilih (linier, logaritmik, dan power) model power adalah model yang terbaik karena menghasilkan nilai yang paling mendekati data empiriknya.

**Kata-kata kunci:** *Bambu, Ikatan pembuluh, Model, Transformed cross section, Sifat mekanis.*

### Abstract

Bamboo anatomy 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 degrade from outer to inner in a regular manner which could be fitted by linear and nonlinear function. Ratio of modulus of Elasticity ( $E$ ) which widely used in transformed cross section method for analyzing the layered system was substituted by ratio of density distribution of vascular bundles within assumption that both are highly correlated. The data in this study proved that there was high Pearson's correlation between the theoretical and empirical result, and the paired t-student test also showed both were not significantly different; thus the new method could be applied in very good result. There are three model applied in this study namely linear, logarithm, and power. Power model is the best among others since its theoretical results the nearest estimation to the empirical measurement.

**Keywords:** *Bamboo, Vascular bundles, Model, Transformed cross section, Mechanical properties.*

## 1. 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 dipergunakan 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. Kekuatan dan kekakuan bambu sangat dipengaruhi oleh jumlah dan luas ikatan pembuluh per satuan luas penampang (Li, 2011). Semakin rapat ikatan pembuluh, maka kekuatan dan kekakuannya meningkat pula. Pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa bagian tepi (dekat kulit) memiliki *vascular bundle* yang sangat rapat, selanjutnya ke arah dalam semakin jarang. (Mustafa, et al 2011, Andre 1998). Lebih lanjut kondisi ini mengakibatkan kekuatan dan kekakuan bambu yang cenderung semakin rendah dari tepi ke dalam. (Ray, 2005). Analisa mekanika dengan mempertimbangkan variasi kekuatan dan kekakuan ini pada berbagai bagian bambu, lebih mendekati kondisi aktual daripada mengasumsikan bambu sebagai material yang homogen.

Pada bidang aksial, kekuatan dan kekakuan bambu bergradasi menurun dari tepi ke luar. Sebuah fungsi tertentu (linier atau non linier) dapat dipergunakan 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 *layer system* yang kekuatan dan kekakuan tiap *layer*-nya merupakan fungsi dari kerapatan ikatan pembuluh. Berkaitan dengan hal tersebut, metode *transformed cross section* dapat dipergunakan sebagai salah satu alat analisis yang cukup memadai untuk menduga kekuatan dan kekakuan bilah bambu maupun bambu laminasi.

Penelitian ini mengamati sebaran kerapatan *vascular bundle* pada penampang melintang bambu, menyusun

fungsi ideal jarak terhadap kerapatan *vascular bundle*, dan selanjutnya melakukan analisa mekanika pengaruh *vascular bundle* terhadap sifat penampang dan Modulus Elastisitas (MOE) bambu laminasi dua lapis. Dari tiga konfigurasi bambu laminasi yang disusun yaitu luar-dalam (LD), luar-luar (LL), dan dalam-dalam (DD) dihitung efisiensi kekakuan yang dihasilkan. Melalui penelitian ini dapat diperoleh metode analisa mekanika bahan yang lebih mendekati kondisi aktual bambu laminasi daripada metode *continuum* mekanik yang mengasumsikan homogenitas material. Selain itu dapat pula dipilih konfigurasi bambu laminasi yang memiliki efisiensi yang terbaik.

## 2. Bahan dan Metode

Bahan yang dipergunakan pada penelitian ini antara lain bilah bambu tali, betung, dan andong berukuran 6 m yang diperoleh dari pangkalan bambu di Bogor. Sedangkan peralatan yang dipergunakan antara lain Mikroskop, Universal Testing Machine (UTM) Instron Type 3369, parang, dan alat-alat *wood working*.

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu:

### 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 dipergunakan untuk contoh uji tarik sejajar serat dan bahan baku bambu laminasi dua lapis.

### 2. Pengamatan anatomi

Ruas bambu yang telah dipotong, disayat bagian penampang lintangnya kemudian diletakkan di atas preparat. Sampel diamati dengan mikroskop dengan perbesaran 10×, kemudian difoto dengan *software* Motic Images Plus 2.0 ML. Setiap foto dipotong secara digital menjadi lima bagian dari arah tepi ke dalam selanjutnya kerapatan ikatan pembuluh dinyatakan sebagai jumlah ikatan pembuluh per luas area yang dihitung pada setiap potongan foto. Median jarak dari tepi pada setiap potongan foto dipergunakan sebagai titik pusat pengamatan. Kerapatan ikatan pembuluh diplotkan pada diagram Cartesius dengan jarak dari tepi sebagai ordinatnya. Kerapatan ikatan pembuluh selanjutnya dinyatakan dalam fungsi jarak dari tepi yang diperoleh dari regresi linier maupun non linier (logaritmik dan power).

### 3. Analisa sifat penampang bilah bambu

Dengan batasan bahwa kekakuan dan kekuatan bambu terutama disumbangkan oleh kerapatan ikatan vaskular, maka rasio modulus elastisitas

pada setiap posisi adalah ekuivalen dengan rasio kerapatan ikatan vaskular (**Persamaan 1**), maka lebar penampang tertransformasi dalam metode *transformed cross section* dapat dimodifikasi dengan rasio kerapatan ikatan vaskular sebagai substitusi dari rasio modulus elastisitas (**Persamaan 2**).

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

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

Karena kerapatan ikatan pembuluh merupakan fungsi dari jarak, maka **Persamaan 2** dapat diubah menjadi:

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

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:

$$b_i \approx \frac{f(y_i)}{f(7.5)} 20 \quad (4)$$

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

a. Luas penampang:

$$A_{tcs} = \int_2^{12} \left( 20 \frac{f(y_i)}{f(7.5)} \right) dy \quad (5)$$

b. Momen pertama penampang:

$$Q_{(tcs)} = \int_2^{12} y \left( 20 \frac{f(y_i)}{f(7.5)} \right) dy \quad (6)$$

c. Centroid:

$$c_{(tcs)} = \frac{Q_{(tcs)}}{A_{(tcs)}} - 2 \quad (7)$$

d. Momen Inersia penampang pada sumbu x:

$$I_{(x)tcs} = \int_2^{12} y^2 \left( 20 \frac{f(y_i)}{f(7.5)} \right) dy \quad (8)$$

e. Momen Inersia penampang pada centroid:

$$I_{(xc)tcs} = I_{(x)tcs} - c_{(tcs)}^2 A_{(tcs)} \quad (9)$$

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

a. Luas penampang:

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

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

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

b. Centroid:

$$c_{\Delta} = \frac{h}{3} \quad (13)$$

$$c_{\blacksquare} = \frac{h}{2} \quad (14)$$

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

c. Momen Inersia penampang pada centroid masing-masing bidang:

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

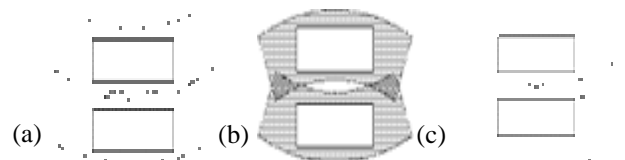
$$I_{\blacksquare} = \frac{bh^3}{12} \quad (17)$$

d. Momen Inersia penampang pada centroid:

$$I_{(xc)tcs} = \sum_{i=1}^5 \left( I_i + (c_i - c_{(tcs)})^2 A_i \right) \quad (18)$$

4. Analisa sifat penampang bambu laminasi dua lapis

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



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

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

a. Luas penampang

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

b. Centroid

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

c. Momen Inersia penampang pada centroid

$$I_{eff} = \sum_{i=1}^2 \left( I_{i(xc)_{tcs}} + (c_{i(tcs)} - c)^2 A_{i(tcs)} \right) \quad (21)$$

d. Momen Inersia penampang actual

$$I_{(act)} = \frac{bh^3}{12} = \frac{20 \times 20^3}{12} = 13333.33 \text{ mm}^4 \quad (22)$$

Rasio modulus elastisitas bambu laminasi dua lapis ( $E_{eff}$ ) dibandingkan bilah bambu bagian pusat ( $E_p$ )

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

Selanjutnya efisiensi bambu laminasi dua lapis ( $S$ ) dinyatakan dengan:

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

5. Pembuatan dan pengujian bambu laminasi

Ketiga konfigurasi bambu laminasi dua lapis (LD, LL, dan DD) dibuat dari tiga jenis bambu yaitu tali, betung, dan andong; masing-masing dari bagian pangkal, tengah, dan ujung. Masing-masing bagian (pangkal, tengah, dan ujung) bertindak sebagai ulangan, dan setiap ulangan dibuat dua contoh uji sebagai sub-ulangan. Dengan demikian terdapat  $(3 \times 3 \times 3 \times 2) = 54$  contoh uji yang dibuat. Selanjutnya contoh uji diuji lentur menggunakan Universal Testing Machine (UTM) INSTRON 3369 dengan konfigurasi *center point loading* mengacu pada ASTM D143-94(2000)e1.

Untuk melakukan verifikasi efisiensi teoritis dengan data empiris, analisa data dilakukan secara bertahap:

- Sebagai data acuan adalah modulus elastisitas bambu laminasi dua lapis dengan konfigurasi luar-dalam (LD) ( $E_{LD}$ )
- Selanjutnya modulus elastisitas bambu laminasi dua lapis dengan konfigurasi luar-luar ( $E_{LL}$ ) dan dalam-dalam ( $E_{DD}$ ) dikurangi dengan  $E_{LD}$  sehingga diperoleh rasio  $D_E$  terhadap  $E_{LD}$  (**Persamaan 25 dan 26**):

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

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

c. Rasio hasil teoritis diperoleh dengan rumusan:

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

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

c. Untuk menguji validitas rasio hasil empiris dibanding rasio hasil teoritis dilakukan uji t-student dengan hipotesa:

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

$$H_1 : R_E - R_R = 0$$

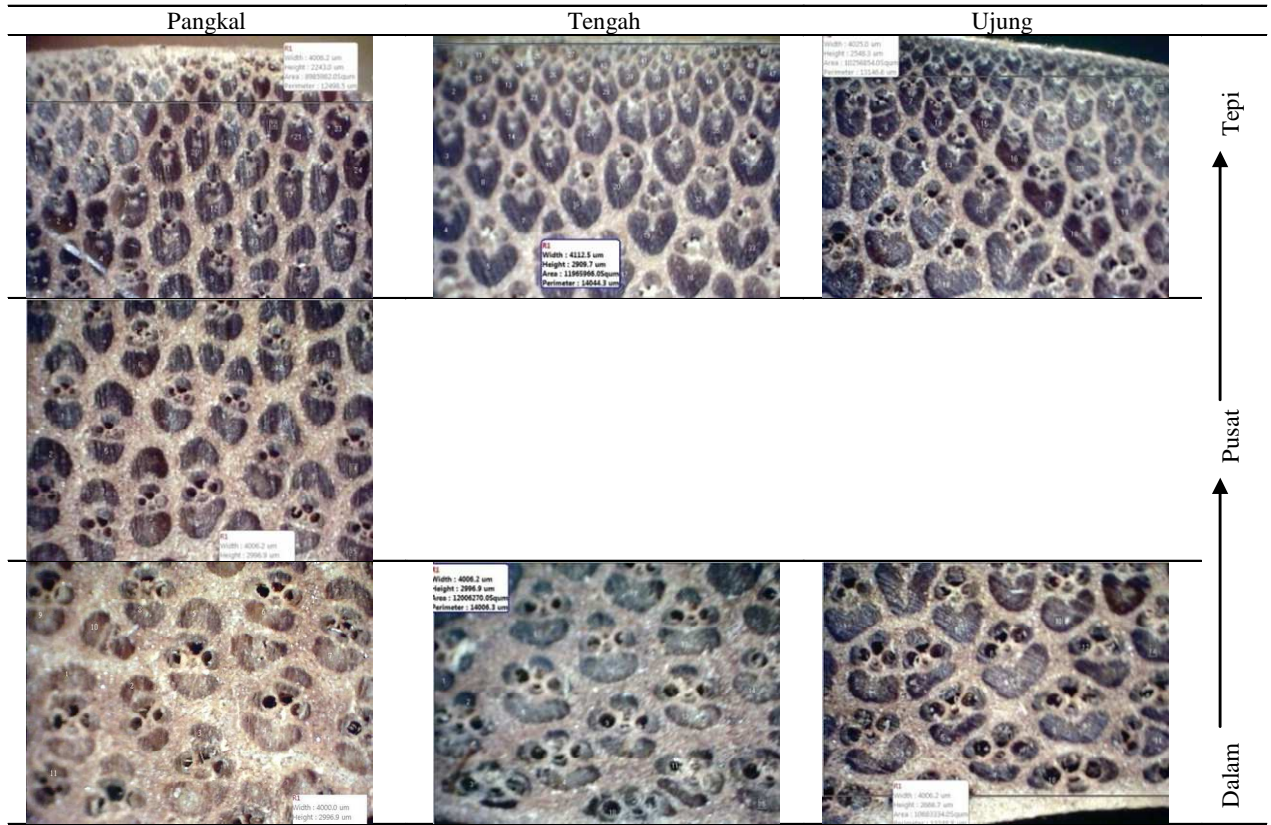
Apabila  $H_0$  ditolak dan  $H_1$  diterima, maka dapat dinyatakan bahwa rasio hasil empiris tidak berbeda dengan rasio hasil teoritis. Kondisi tersebut memiliki konsekuensi hasil teoritis adalah cukup memadai untuk menduga hasil empiris, sehingga rasio kerapatan ikatan vaskular bambu dapat dipergunakan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

### 3. Hasil dan Pembahasan

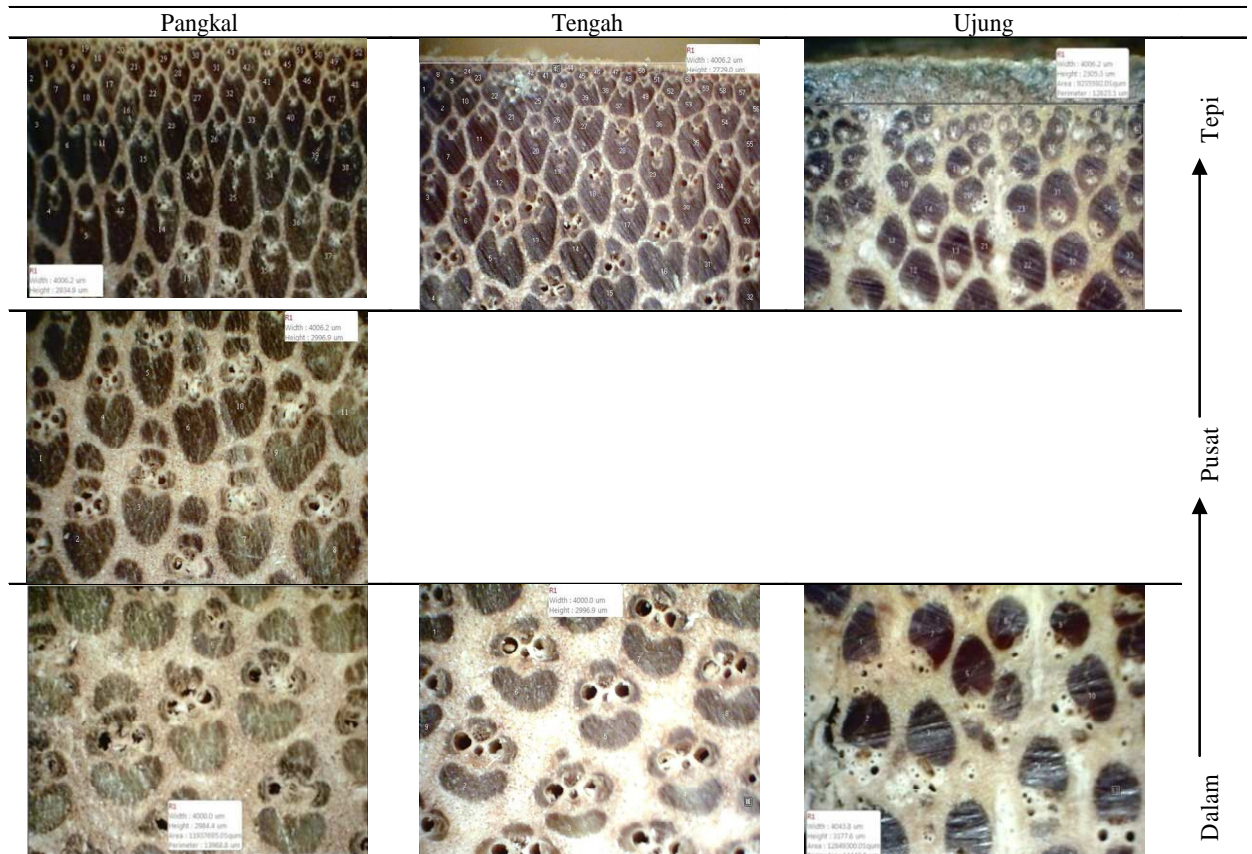
#### 3.1 Distribusi *vascular bundles*

Secara umum terlihat bahwa jumlah ikatan pembuluh per satuan luas (selanjutnya disebut kerapatan ikatan pembuluh) pada ketiga jenis bambu menurun dari tepi ke dalam, namun ukuran luas masing-masing ikatan pembuluh semakin kecil. (**Gambar 2, 3, dan 4**). Ikatan pembuluh terdiri atas sel sklerenkim, metaxylem, protoxylem, dan phloem. Dibanding 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 vaskular. 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.

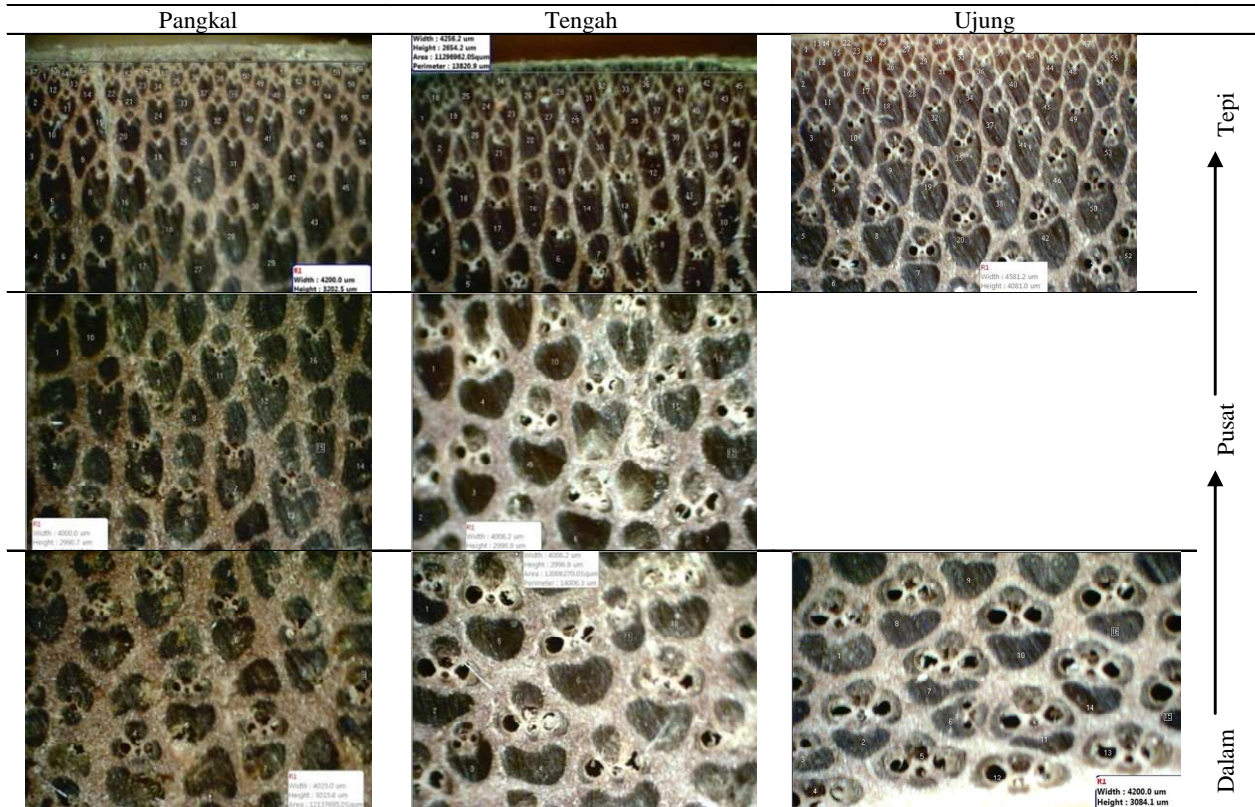
Kerapatan ikatan pembuluh ( $\text{buah}/\text{mm}^2$ ) dihitung dengan cara membagi setiap foto mikroskop menjadi 5 bagian, lalu setiap bagian dihitung jumlahnya. Hasil pengamatan disajikan pada **Gambar 5(a,b, c, dan d)**. Tiga buah fungsi regresi yaitu linier, logaritmik, dan power dicoba untuk mengepas titik-titik data pada diagram kartesius (**Tabel 1**). Secara umum fungsi non linier lebih baik dalam mengepas kerapatan ikatan vaskular pada berbagai jarak dari tepi bambu. Namun karena analisis mekanika menjadi lebih sederhana pada fungsi linier daripada fungsi nonlinier, maka regresi linier tetap dipertahankan. Khusus bambu andong (**Gambar 5c dan 5d**) tampak bahwa kerapatan ikatan vaskular bagian ujung jauh lebih rendah daripada pangkal dan tengah pada kedalaman yang sama. Oleh karena itu perlu dipisahkan bagian ujung dari dua 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.



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

Tabel 1. Fungsi regresi linier, logaritmik, dan power untuk mengepas kerapatan ikatan vaskular pada berbagai kedalaman

Jenis bambu	Linier	Non-linier (logaritmik)	Non-linier (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)	$y = -0.158x + 1.147; R^2 = 0.650$	$y = -0.46\ln(x) + 1.050; R^2 = 0.927$	$y = 0.919x^{-0.65}; R^2 = 0.993$

### 3.2 Analisa sifat penampang bilah bambu

Metode *transformed cross section* telah lazim digunakan secara luas untuk analisa material yang berlapis-lapis (*layered system*). Metode ini mentransformasi lebar penampang suatu material sesuai dengan rasio modulus elastisitas (E)-nya. Material yang ber-E tinggi akan diperlebar, sedangkan yang ber-E 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*). Dengan asumsi bahwa rasio E adalah ekuivalen dengan rasio kerapatan ikatan pembuluh, maka bentuk penampang tertransformasi tersebut dapat juga dibangun dari fungsi kerapatan ikatan pembuluh. Dengan demikian, ketiga model regresi (linier, logaritmik, dan power) dari kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai kedalaman dapat digunakan untuk membangun bentuk penampang tertransformasi dan melakukan analisa sifat penampangnya.

#### 3.2.1 Model linier

Bambu setebal 15 mm dengan lebar 20 mm, bagian tepi dan dalamnya masing-masing disayat 2 mm dan 3 mm sehingga menghasilkan bilah bambu tanpa kulit dan tanpa matriks setebal 10 mm (**Gambar 6a** dan **6b**). Selanjutnya, apabila bagian pusat dipergunakan sebagai nilai standar, maka bagian dalam akan tertransformasi menjadi lebih sempit karena Modulus Elastisitas (E)-nya lebih kecil daripada bagian pusat, sebaliknya bagian tepi menjadi lebih lebar. Perubahan lebar ini sebanding dengan besarnya rasio Modulus Elastisitas suatu bagian dibandingkan bagian standar terpilih (dalam kasus ini dipilih pusat bambu sebagai standar). Oleh karena rasio E diasumsikan ekuivalen dengan rasio kerapatan *vascular bundle* maka penampang tertransformasi dapat dibangun dari persamaan berikut:

a. Bambu Tali:

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7.5)} = 20 \frac{-0.516y + 6.221}{2.351} = -4.39y + 52.92; \text{ untuk } 2 < y < 12$$

(29)

b. Bambu Betung

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7.5)} = 20 \frac{-0.647y + 7.255}{2.403} = -5.386y + 60.395; \text{ untuk } 2 < y < 12 \quad (30)$$

c. Bambu Andong

$$b_{tcs} = 20 \frac{f(y)}{f(7.5)} = 20 \frac{-0.393y + 4.751}{1.804} = -4.36y + 52.69; \text{ untuk } 2 < y < 12 \quad (31)$$

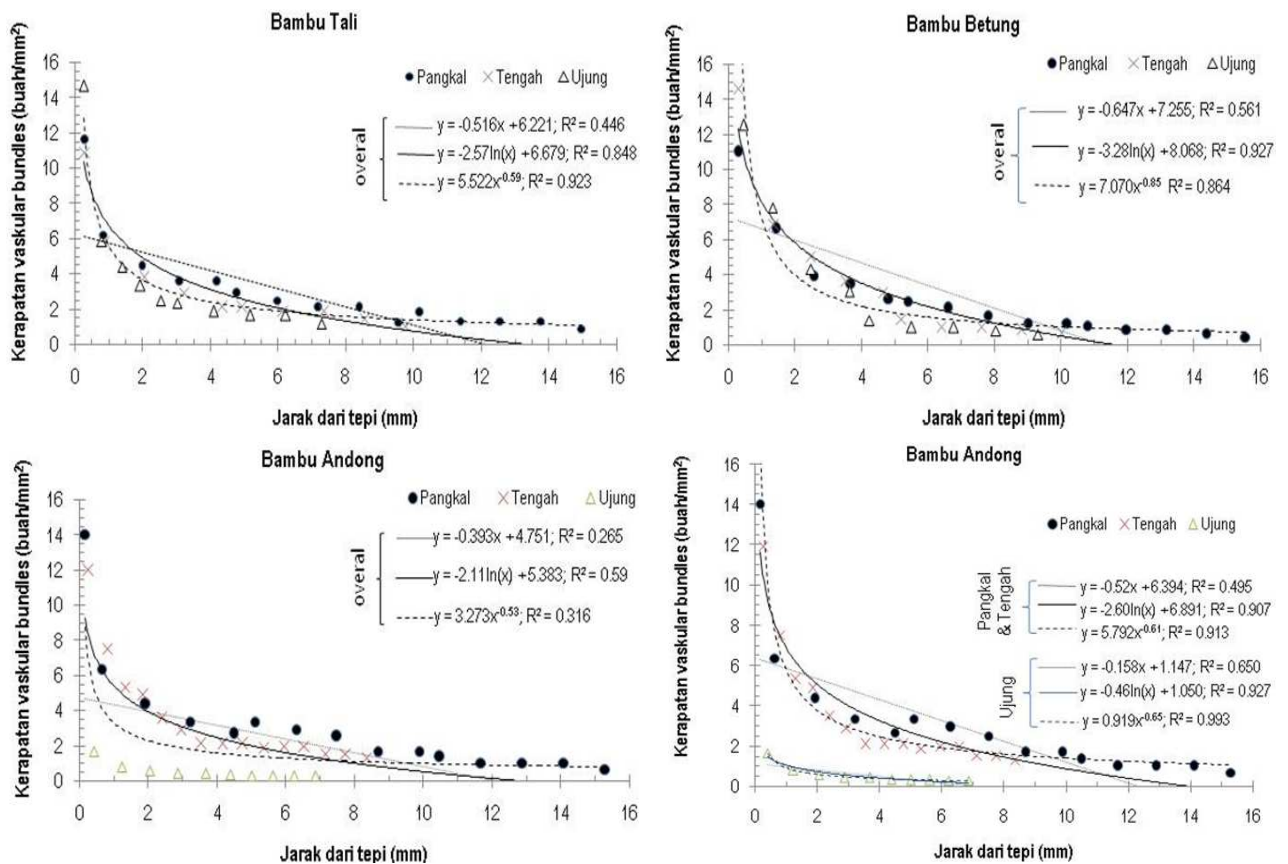
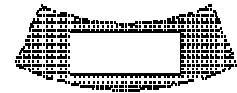
Sesuai dengan **Persamaan 29 - 31** maka penampang tertransformasi berbentuk trapesium dengan tinggi 20 mm, dan panjang sisi atas dan bawah seperti tersaji pada **Gambar 7**. Khusus untuk bambu betung pemilihan

bilah standar yaitu sejauh 7.5 mm dari tepi mengakibatkan panjang sisi atas bernilai negatif sehingga model linier tidak tepat diterapkan pada kasus bambu betung ini. Untuk mendapatkan sifat-sifat penampang tertransformasi, bidang trapesium tersebut dibagi menjadi 3 bagian, yaitu dua bidang segitiga siku-siku dan satu bidang persegi empat. Posisi centroid masing-masing bidang dapat dilihat pada **Gambar 8**.

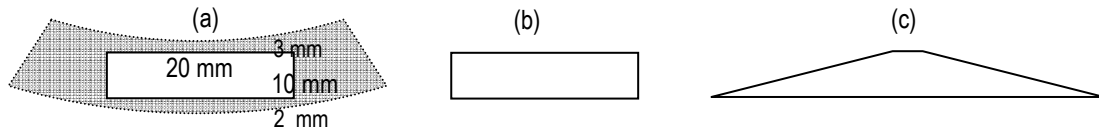
Selanjutnya, dengan menggunakan **Persamaan 20** diperoleh centroid penampang tertransformasi untuk bilah bambu tali dan bambu andong, berturut-turut adalah 3.35 mm dan 3.36 mm untuk bambu tali dan andong. Sedangkan momen inersia pada centroidnya dihitung melalui **Persamaan 16** dan **17** yang dilanjutkan dengan **Persamaan 18**. Hasil sifat-sifat penampang tertransformasi pada model linier disajikan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Sifat-sifat penampang bambu tali dan andong dengan model transformasi linier

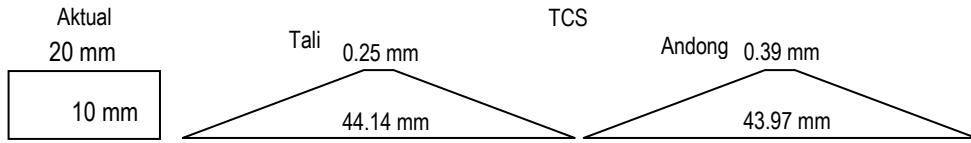
	Tali	Andong
Luas Penampang (A)	221.95 mm <sup>2</sup>	221.8 mm <sup>2</sup>
Centroid ( $\bar{y}$ )	3.3521mm	3.3626 mm
Momen Inersia pada Centroid	1246.87 mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>



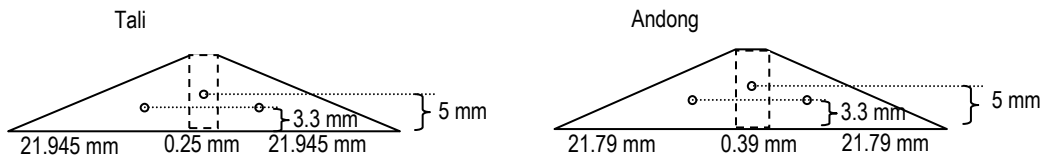
**Gambar 5.** Plot dan garis regresi kerapatan ikatan pembuluh pada berbagai kedalaman pada: (a) bambu tali, (b) bambu betung, (c) bambu andong, (d) bambu andong terpisah ujungnya



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



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



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

3.2.2 Model nonlinier (logaritmik)

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

$$b(y) = 20 \frac{f(y)}{f(7.5)}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (32)$$

Sehingga untuk masing-masing bambu dapat dinyatakan dengan:

a. Bambu Tali:

$$b(y) = 20 \frac{-2.57 \ln(y) + 6.679}{-2.57 \ln(7.5) + 6.679} = -34.251 \ln(y) + 89.012; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (33)$$

b. Bambu Betung

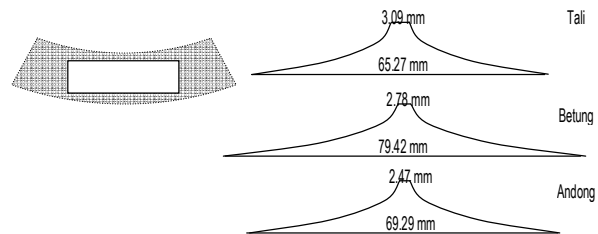
$$b(y) = 20 \frac{-3.28 \ln(y) + 8.068}{-3.28 \ln(7.5) + 8.068} = -44.959 \ln(y) + 110.587; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (34)$$

c. Bambu Andong

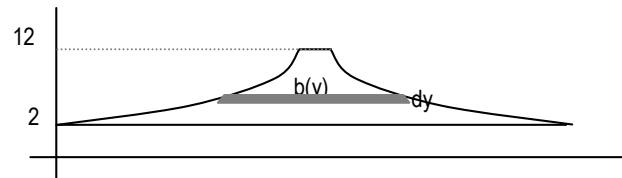
$$b(y) = 20 \frac{-2.11 \ln(y) + 5.383}{-2.11 \ln(7.5) + 5.383} = -37.294 \ln(y) + 95.143; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (35)$$

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

Untuk melakukan analisa penampang, diperlukan model differensial seperti Gambar 10.



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



Gambar 10. Sketsa pemodelan logaritmik untuk analisa sifat penampang

Seperti terlihat pada Gambar 10, daerah yang diarsir diasumsikan berbentuk persegi empat karena  $dy$  sangatlah kecil. Dengan demikian luas penampang tertransformasi dapat dinyatakan dengan

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

Sehingga untuk masing-masing bambu, luas area tertransformasinya adalah:

a. Bambu Tali

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -34.251 \ln(y) + 89.012 dy \quad (37)$$

Yang dapat diselesaikan menjadi:

$$A_{tcs} = [-34.251 y \ln(y) + 123.236 y]_2^{12} = 258.786 \text{ mm}^2 \quad (38)$$



b. Bambu Betung

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -44.959 \ln(y) + 110.587 dy \quad (39)$$

$$A_{tcs} = [-44.959 y \ln(y) + 155.546 y]_2^{12} = 277.159 \text{ mm}^2 \quad (40)$$

c. Bambu Andong

$$A_{tcs} = \int_2^{12} -37.294 \ln(y) + 95.143 dy \quad (41)$$

$$A_{tcs} = [-37.294 y \ln(y) + 132.437 y]_2^{12} = 264.005 \text{ mm}^2 \quad (42)$$

Selanjutnya momen pertama penampang dapat dinyatakan dengan:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} yb(y)dy \quad (43)$$

Sehingga masing-masing bambu mempunyai momen pertama penampang sebagai berikut:

a. Bambu Tali

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} (-34.251 \ln(y) + 89.012)ydy \quad (44)$$

$$Q_{tcs} = [-17.1255y^2 \ln(y) + 53.06875 y^2]_2^{12} = 1349.148257 \text{ mm}^3 \quad (45)$$

b. Bambu Betung

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} (-44.959 \ln(y) + 110.587)ydy \quad (46)$$

$$Q_{tcs} = [-22.4795y^2 \ln(y) + 66.53325 y^2]_2^{12} = 1333.219307 \text{ mm}^3 \quad (47)$$

c. Bambu Andong

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} (-37.294 \ln(y) + 95.143)ydy \quad (48)$$

$$Q_{tcs} = [-18.647y^2 \ln(y) + 56.895 y^2]_2^{12} = 1344.608643 \text{ mm}^3 \quad (49)$$

Sehingga centroid ditinjau dari sumbu  $x$  adalah:

a. Bambu Tali

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

b. Bambu Betung

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

c. Bambu Andong

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

Dan bila ditinjau dari alas penampang tertransformasi maka centroid ( $\bar{y}$ ) berjarak sejauh 3.21 mm, 2.81 mm, dan 3.09 mm berturut-turut untuk bambu Tali, Betung, dan Andong.

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

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

Sehingga untuk masing-masing bambu dapat diperoleh:

a. Bambu Tali

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

$$I_x = [-11.417 y^3 \ln(y) + 33.4763 y^3]_2^{12} = 8618.933 \text{ mm}^4 \quad (55)$$

b. Bambu Betung

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

$$I_x = [-14.9863 y^3 \ln(y) + 41.858 y^3]_2^{12} = 7728.382848 \text{ mm}^4 \quad (57)$$

c. Bambu Andong

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

$$I_x = [-12.4313 y^3 \ln(y) + 35.858 y^3]_2^{12} = 8365.750508 \text{ mm}^4 \quad (59)$$

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

a. Bambu Tali

$$I_{xc} = 8618.932931 - 5.213^2 \times 258.786 = 1586.33 \text{ mm}^4 \quad (60)$$

b. Bambu Betung

$$I_{xc} = 7728.382848 - 4.810^2 \times 277.159 = 1316.01 \text{ mm}^4 \quad (61)$$

c. Bambu Andong

$$I_{xc} = 8365.750508 - 5.093^2 \times 264.005 = 1517.82 \text{ mm}^4 \quad (62)$$

Dengan demikian sifat-sifat penampang tertransformasi logaritmik dari masing-masing bambu dapat diringkas dalam **Tabel 3**.

**Tabel 3. Sifat-sifat penampang bambu tali dan andong dengan model transformasi logaritmik**

	Tali	Betung	Andong
Luas Penampang (A)	258.79 mm <sup>2</sup>	277.16 mm <sup>2</sup>	264.01 mm <sup>2</sup>
Centroid ( $\bar{y}$ )	3.21 mm	2.81 mm	3.09 mm
Momen Inersia pada Centroid	1586.3 mm <sup>4</sup>	1316.01 mm <sup>4</sup>	1517.82 mm <sup>4</sup>



3.2.3 Model nonlinier (power)

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

$$b(y) = 20 \frac{f(y)}{f(7.5)}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (63)$$

Sehingga untuk masing-masing bambu dapat dinyatakan dengan:

a. Bambu Tali:

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

b. Bambu Betung

$$b(y) = \frac{7,070y^{-0.85}}{7,070(7.5)^{-0.85}} = 110.8746y^{-0.85}; \text{ untuk } 2 \leq y \leq 12 \quad (65)$$

c. Bambu Andong

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

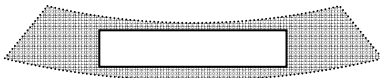
Berdasarkan Persamaan 64, 65, dan 66, dibangun bentuk penampang tertransformasi seperti pada Gambar 11:

Selanjutnya model sketsa gambar model diferensialnya disajikan pada Gambar 12

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

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

Sehingga untuk masing-masing bambu, luas area tertransformasinya adalah:



a. Bambu Tali

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

Yang dapat diselesaikan menjadi:

$$A_{tcs} = [160.152y^{0.41}]_2^{12} = 230.813 \text{ mm}^2 \quad (69)$$

b. Bambu Betung

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

$$A_{tcs} = [739.164y^{0.15}]_2^{12} = 252.891 \text{ mm}^2 \quad (71)$$

c. Bambu Andong

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

$$A_{tcs} = [123.798y^{0.47}]_2^{12} = 226.569 \text{ mm}^2 \quad (73)$$

Selanjutnya momen pertama penampang dapat dinyatakan dengan:

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} yb(y)dy \quad (74)$$

Sehingga masing-masing bambu mempunyai momen pertama penampang sebagai:

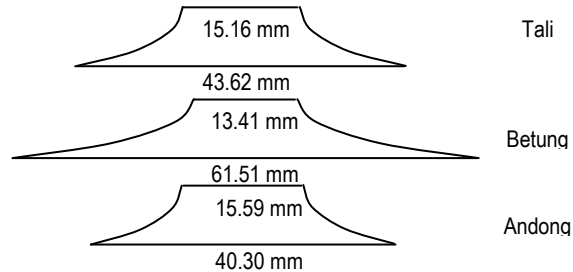
a. Bambu Tali

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} (65.6623 y^{-0.59})ydy \quad (75)$$

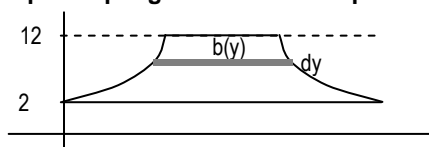
$$Q_{tcs} = [46.569 y^{1.41}]_2^{12} = 1424.1475 \text{ mm}^3 \quad (76)$$

b. Bambu Betung

$$Q_{tcs} = \int_2^{12} (110.8746y^{-0.85})ydy \quad (77)$$



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



Gambar 12. Sketsa pemodelan power untuk analisa sifat penampang bambu

$$Q_{tcs} = [96.412 y^{1.15}]_2^{12} = 1465.596 \text{ mm}^3 \quad (78)$$

c. Bambu Andong

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

$$Q_{tcs} = [39.582y^{1.47}]_2^{12} = 1417.534516 \text{ mm}^3 \quad (80)$$

Sehingga centroid ditinjau dari sumbu  $x$  adalah:

a. Bambu Tali

$$\bar{y} = \frac{Q_{tcs}}{A_{tcs}} = \frac{1424.1475}{230.813} = 6.17 \text{ mm} \quad (81)$$

b. Bambu Betung

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

c. Bambu Andong

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

Sehingga centroid ditinjau dari alas penampang adalah 4.17 mm, 3.80 mm, dan 3.61 mm masing-masing untuk bambu tali, bentung, dan andong.

Momen inersia pada sumbu  $x$  untuk masing-masing bambu dapat diperoleh:

a. Bambu Tali

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

$$I_x = [27.246y^{2.41}]_2^{12} = 10722.601 \text{ mm}^4 \quad (85)$$

b. Bambu Betung

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

$$I_x = [51.570y^{2.15}]_2^{12} = 10551.48039 \text{ mm}^4 \quad (87)$$

c. Bambu Andong

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

$$I_x = [23.557 y^{2.47}]_2^{12} = 10776.18057 \text{ mm}^4 \quad (89)$$

Dan momen inersia pada centroidnya adalah:

a. Bambu Tali

$$I_{xc} = 10722.601 - 6.17^2 \times 230.813 = 1935.80 \text{ mm}^4 \quad (90)$$

b. Bambu Betung

$$I_{xc} = 10551.48039 - 5.795^2 \times 252.891 = 2058.89 \text{ mm}^4 \quad (91)$$

c. Bambu Andong

$$I_{xc} = 10776.18057 - 5.605^2 \times 226.569 = 3658.283 \text{ mm}^4 \quad (92)$$

Dengan demikian sifat-sifat penampang tertransformasi power dari masing-masing bilah bambu dapat diringkas dalam **Tabel 4** berikut:

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

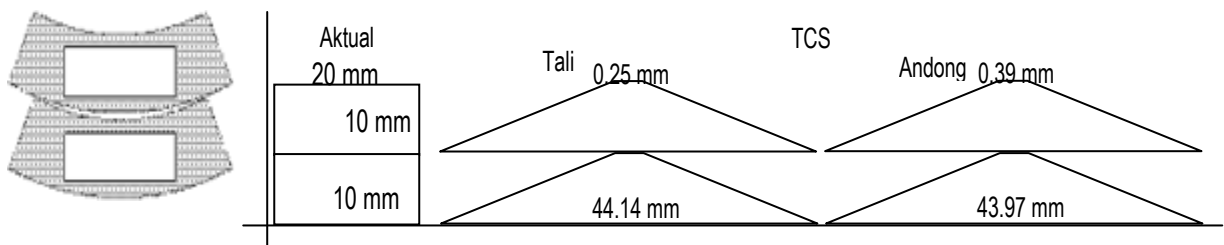
	Tali	Betung	Andong
Luas Penampang (A)	230.813 mm <sup>2</sup>	252.891 mm <sup>2</sup>	226.569 mm <sup>2</sup>
Centroid ( $\bar{y}$ )	4.17 mm	3.795 mm	3.605 mm
Momen Inersia pada Centroid	1935.804 mm <sup>4</sup>	2058.889 mm <sup>4</sup>	3658.283 mm <sup>4</sup>

**3.3 Analisa sifat penampang bambu laminasi dua lapis**

**3.3.1 Model linier**

a. Konfigurasi luar-dalam (LD)

Pada model linier, bambu laminasi dua lapis dapat diilustrasikan seperti pada **Gambar 13**.



**Gambar 13. Ilustrasi penampang tertransformasi model linier dari bambu laminasi dua lapis konfigurasi luar-dalam**

Untuk menentukan centroid penampang tertransformasi, maka penampang tersebut dibagi menjadi 5 bagian yaitu: A, B, C, D, dan E (**Gambar 14**) sehingga centroid masing-masing bagian dapat ditentukan dengan:

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

Oleh karena itu centroid masing-masing bidang bila ditinjau dari sumbu  $x$  pada diagram cartesius adalah seperti tersaji pada **Gambar 14**:

Dengan demikian centroid penampang tertransformasi ditinjau dari sumbu  $x$  dapat dihitung dengan **Persamaan 18**, dan menghasilkan nilai masing-masing 8.38 mm dan 8.36 mm untuk bambu Tali dan Andong. Oleh karena sumbu  $x$  berimpit dengan alas bidang tertransformasi, maka nilai centroid tersebut adalah identik dengan centroid yang ditinjau dari alasnya. (**Gambar 15**). **Gambar 15** selanjutnya dapat dipergunakan untuk menghitung momen inersia penampang tertransformasi yaitu:

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

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

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

2. Untuk penampang persegi panjang, momen inersia pada sumbu yang berimpit dengan alasnya ( $I_x$ ) adalah

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

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

Selanjutnya, dengan menggunakan teorema sumbu sejajar, maka momen inersia penampang tertransformasi dapat dihitung dengan **Persamaan 18**, sehingga diperoleh nilai sebesar 13591.02 mm<sup>4</sup> dan 13596.64 mm<sup>4</sup>.

Modulus Elastisitas efektif dapat dihitung sebagai:

$$E_{ef} = \frac{E_{tcs} I_{tcs}}{I_{ac}} \tag{93}$$

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)

Sehingga masing-masing bambu memiliki rasio E efektif dibanding E standar (yaitu nilai E pada pusat bambu) yang dapat dihitung sebagai berikut:

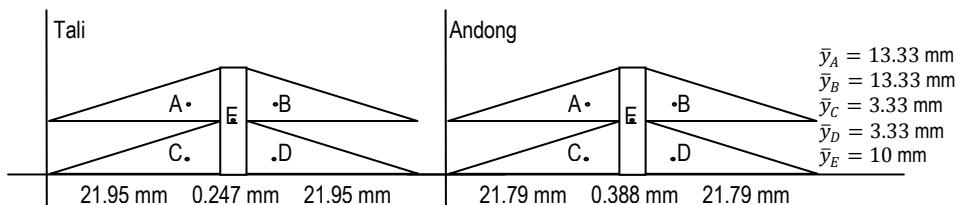
$$1. \text{ Tali : } \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{13591.02}{13333.33} \times 100\% = 101.932\% \tag{94}$$

$$2. \text{ Andong : } \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{13596.64}{13333.33} \times 100\% = 101.975\% \tag{95}$$

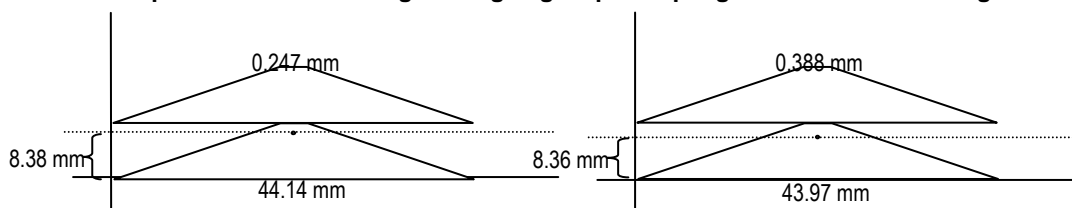
Berdasarkan persamaan tersebut dapat diperoleh bahwa modulus elastisitas bambu laminasi dua lapis dengan konfigurasi luar-dalam akan diperoleh nilai MOE efektif yang  $\pm 1.9\%$  lebih tinggi daripada MOE bambu bagian pusat.

b. Konfigurasi luar-luar (LL)

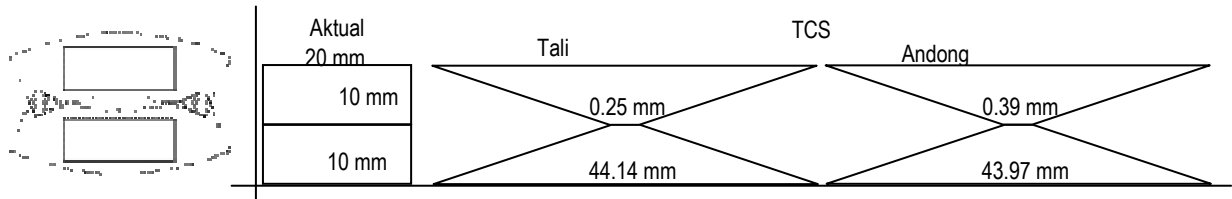
Analisa *transformed cross section* (TCS) dengan model linier untuk bambu laminasi dua lapis konfigurasi luar-luar (LL) diilustrasikan seperti pada **Gambar 16**, sedangkan centroid masing-masing bagian disajikan pada **Gambar 17**.



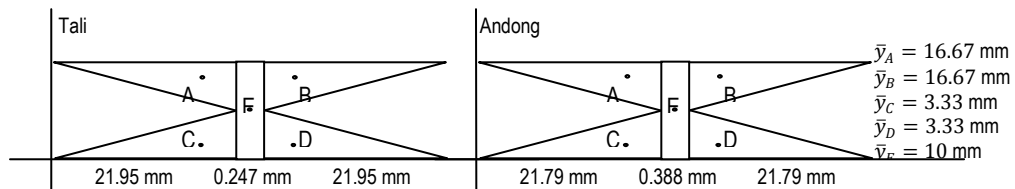
**Gambar 14.** Ilustrasi posisi centroid masing-masing bagian penampang tertransformasi konfigurasi luar-dalam



**Gambar 15.** Ilustrasi posisi centroid penampang tertransformasi linier konfigurasi luar-dalam



Gambar 16. Ilustrasi penampang tertransformasi model linier dari bambu laminasi dua lapis konfigurasi luar-luar



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

Karena penampang tertransformasi berbentuk simetris, maka centroid terletak tepat di tengah, yaitu sejauh 10 mm dari sumbu x, sehingga momen inersianya adalah  $22112.5 \text{ mm}^4$  dan  $22049.72 \text{ mm}^4$  masing-masing untuk bambu tali dan andong. Selanjutnya rasio E efektif terhadap E standar adalah:

$$1. \text{ Tali} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{22112.58}{13333.33} \times 100\% = 165.84\% \quad (96)$$

$$2. \text{ Andong} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{22049.72}{13333.33} \times 100\% = 165.37\% \quad (97)$$

Sehingga apabila konfigurasi luar-luar yang digunakan untuk membuat bambu laminasi dua lapis, maka bambu laminasinya akan memiliki MOE  $\pm 65\%$  lebih tinggi daripada bilah bambu bagian pusat.

c. Konfigurasi dalam-dalam (DD)

Analisa transformed cross section (TCS) dengan model linier untuk bambu laminasi dua lapis konfigurasi dalam-dalam (DD) diilustrasikan seperti pada Gambar

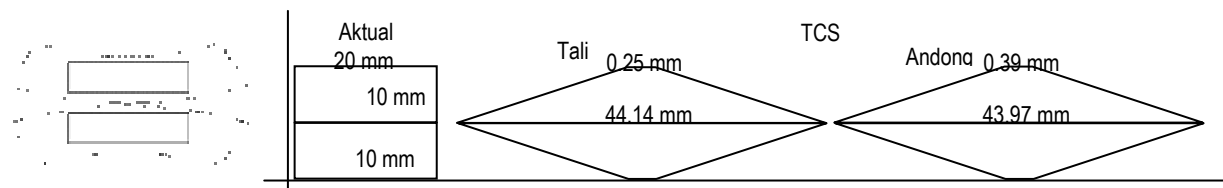
18, sedangkan centroid masing-masing bagian disajikan pada Gambar 19.

Serupa dengan konfigurasi luar-luar (LL), konfigurasi dalam-dalam (DD) berbentuk simetris sehingga centroidnya juga terletak di tengah (10 cm dari sumbu x). Momen inersia penampang pada Gambar 19 adalah  $7480.50 \text{ mm}^4$  dan  $7522.41 \text{ mm}^4$  untuk bambu tali dan andong, dan efisiensinya dapat dihitung:

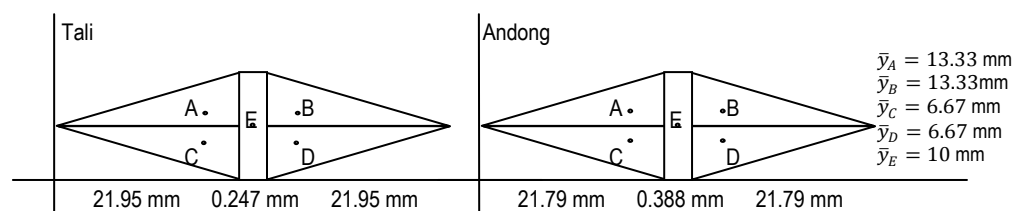
$$1. \text{ Tali} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{7480.50}{13333.33} \times 100\% = 56.42\% \quad (98)$$

$$2. \text{ Andong} : \frac{E_{ef}}{E_{tcs}} = \frac{7522.41}{13333.33} \times 100\% = 56.10\% \quad (99)$$

Sehingga apabila konfigurasi dalam-dalam yang digunakan untuk membuat bambu laminasi dua lapis, maka bambu laminasinya akan memiliki MOE  $\pm 43\%$  lebih rendah daripada MOE bilah bambu bagian pusat. Secara ringkas, sifat-sifat penampang tertransformasi linier dan efisiensinya, dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 18. Ilustrasi penampang tertransformasi model linier dari bambu laminasi dua lapis konfigurasi



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

Tabel 4. Ringkasan sifat-sifat penampang tertransformasi linier bambu dan efisiensinya

Jenis Bambu	Model Transformasi Linier		
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 Dua 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
Rasio ( $E_{eff}/E_{ics}$ ) (%)			
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

3.3.2 Model nonlinier (logaritmik dan power)

Berdasarkan sifat-sifat penampang pada model logaritmik dapat diturunkan sifat mekanis bambu laminasi dua 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 a, b, dan c. Sifat-sifat setiap bidang pada Gambar 20 dan 21 dapat dihitung dengan Persamaan 19 sampai 22, dan menghasilkan nilai-nilai sebagaimana tersaji pada Tabel 5.

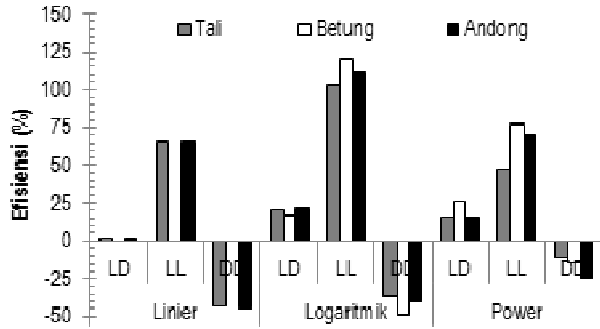
3.4 Efisiensi teoritis bambu laminasi dua lapis

Sesuai dengan Tabel 4 dan 5, tiga macam konfigurasi bambu laminasi dua lapis memiliki efisiensi yang berbeda-beda (Gambar 20). Konfigurasi luar-luar

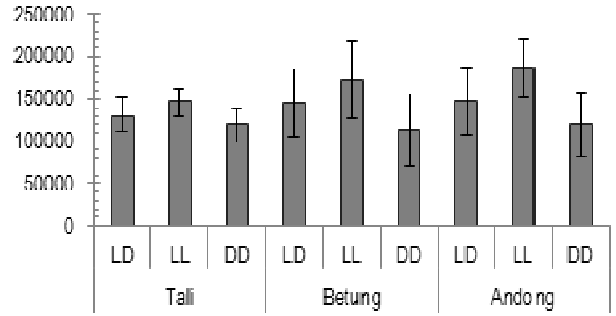
(LL) merupakan pilihan yang paling efisien sedangkan konfigurasi dalam-dalam (DD) adalah yang paling tidak efisien. Pada konfigurasi LL, lapisan bambu yang paling kaku terletak jauh dari garis netral sehingga memberikan tahanan yang lebih tinggi terhadap perubahan bentuk. Nilai kekakuan yang tinggi pada 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 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.

Tabel 5. Ringkasan sifat-sifat penampang tertansformasi nonlinier bambu dan efisiensinya

Jenis Bambu	Model Transformasi Logaritmik			Model Transformasi Power		
	LD	LL	DD	LD	LL	DD
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
Centroid						
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
Rasio ( $E_{eff}/E_{ics}$ ) (%)						
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



Gambar 20. Efisiensi teoritis bambu laminasi dua lapis dibandingkan bilah bambu bagian pusat



Gambar 21. Hasil pengujian lentur bambu laminasi dua lapis

### 3.5 Pengujian empiris bambu laminasi dua lapis

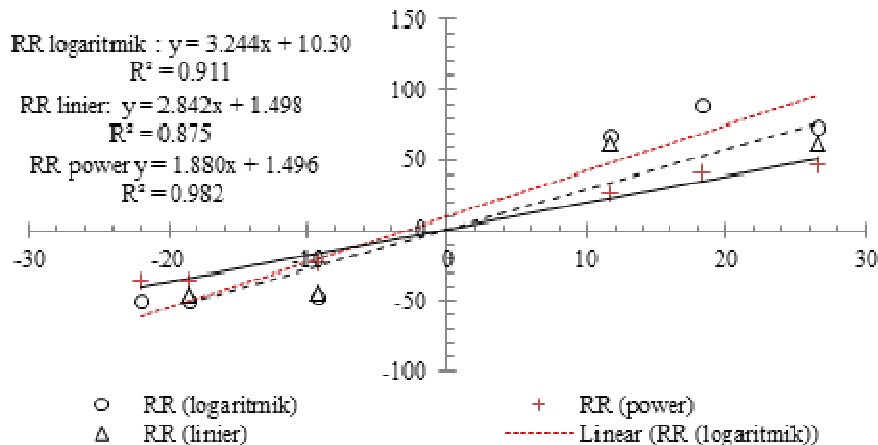
Pengujian empiris di laboratorium menghasilkan modulus elastisitas sebagaimana disajikan pada Gambar 21. Pada grafik tersebut terlihat bahwa konfigurasi dalam-dalam (DD) pada bambu laminasi dua lapis merupakan yang paling lentur dibandingkan dua konfigurasi lainnya. Sedangkan konfigurasi luar-luar (LL)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

### 3.6 Validasi teoritis dengan hasil empiris

Seperti disajikan pada Tabel 6, hasil teoritis baik transformasi linier, logaritmik, dan power masing-masing memiliki nilai korelasi Pearson yang sangat tinggi sehingga terdapat hubungan linier yang cukup baik antara hasil teori dan empiris (Gambar 22). Uji *t-student* data berpasangan juga menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang nyata antara hasil teori dan empiris. Ditinjau dari nilai signifikansinya, dapat dilihat bahwa transformasi power merupakan model yang paling mendekati nilai empiris dibanding dua model transformasi lainnya.

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

	$R_E$	$R_R$ (linier)	$R_E$	$R_R$ (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



Gambar 22. Regresi linier validasi hasil teoritis model transformasi linier, logaritmik, dan power terhadap data empirisnya

#### 4. Kesimpulan

- 1) Kerapatan vaskular bundles bambu berdegradasi dari tepi hingga ke dalam sehingga dapat diturunkan fungsi linier dan non linier sebagai pendekatan matematiknya.
- 2) Rasio kerapatan vaskular bundles dapat dipergunakan sebagai pengganti rasio modulus elastisitas dalam metode transformed cross section karena hasil teoritis dari model yang diturunkan ternyata tidak berbeda dengan nilai empirisnya.
- 3) Model transformasi terbaik adalah power karena nilainya paling mendekati hasil empirisnya.

#### Daftar Pustaka

- Andre J.P., 1998, A Study of the Vascular Organization of Bamboos (Poaceae-Bambusae) Using Micro-casting Method. *IAWA Journal*. Vol 19 (3):265-278.
- [ASTM] American Society for Testing and Materials, 2000, *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. United States: ASTM D 143 – 94 (Reapproved 2000). West Conshohocken, PA.
- Li, H.B., Shen, S.P., 2011, The Mechanical Properties of Bamboo and Vascular Bundles. *Journal of Materials Research*. Vol. 26 : pp 2749-2756.
- Mustafa, M.T., Wahab, R.M., Sudin, Sulaiman, O., Kamal, N.A.M., Khalid, I., 2011, Anatomical and Microstructures Features of Tropical Bamboo *Gigantochloa Brang*, *G. levis*, *G. scotechinii* and *G. wrayi*, *International Journal of Forest, Soil and Erosion*, 1 (1):25-35.
- Ray, A.K, Mondal, S., Das, S.K., Ramachandrarao, P., 2005, Bamboo - A Functionally Graded Composite-correlation Between Microstructure and Mechanical Strength. *Journal of Material Science*. Vol. 40 (2005):5249-5253.