

Pengaruh Komponen Kimia dan Ikatan Pembuluh terhadap Kekuatan Tarik Bambu

Effendi Tri Bahtiar

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

Naresworo Nugroho

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

Surjono Surjokusumo

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

Lina Karlinasari

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

Deded Sarip Nawawi

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680
E-mail: dnawawi66@yahoo.com

Dwi Premadha Lestari

Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680
E-mail: dwiplestari@yahoo.co.id

Abstrak

Bambu merupakan salah satu contoh material komposit alami yang tersusun atas beraneka ragam sel. Sel-sel fiber yang tersusun menjadi ikatan pembuluh diyakini merupakan sel yang paling bertanggung jawab terhadap kekuatan bilah bambu. Selain jumlah ikatan pembuluh, kekuatan tarik bambu juga dipengaruhi oleh kandungan komponen kimia dan bagian ruas/buku. Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah ikatan pembuluh, maka kekuatan tarik bambu semakin besar. Kandungan lignin meningkatkan kekuatan tarik pada bagian ruas secara proporsional (linier), bahkan kuadratik pada bagian buku. Peningkatan kandungan lignin dalam selang yang ditemukan dalam penelitian ini (33%) selalu meningkatkan kekuatan tarik bilah bambu sehingga titik balik maksimum tidak dapat ditemukan. Tingginya nilai korelasi kekuatan tarik dengan proporsi alpha selulosa terhadap holosekulosa pada bagian ruas memperlihatkan pentingnya peranan proporsi alpha selulosa tersebut, meskipun prosedur best subset regression tidak membacanya akibat terjadinya autokorelasi.

Kata-kata Kunci: *Bambu, Best subset regression, Ikatan pembuluh, kekuatan tarik, Komponen kimia.*

Abstract

Bamboo is natural composite material which is built from many types of cells. Fibers cells which are bundled become vascular bundles have highest contribution toward the strength of bamboo split among others. Besides the amount of vascular bundles, the bamboo split strength is also determined by chemical component of cell walls and its position (internodes/node). This research reported that the tensile strength has positive correlation with the amount of vascular bundles. If the amount vascular bundles increase, then the tensile strength also increases. The increasing of lignin contents in cell wall proportionally and quadratically increases the tensile stress of internodes and node of bamboo split, respectively. This research did not found the maximum stationer point of quadratic equation for lignin content effect toward bamboo split tensile strength, thus the tensile strength always increase along with the lignin content in this research range (<33%). Correlation value between tensile strength and ratio of alpha cellulose to holocellulose is high which prove that alpha cellulose highly contribute to the tensile strength even though best subset regression procedure could not identified this phenomenon because of its autocorrelation occurrence.

Keywords: *Bamboo, Best subset regression, Vascular bundles, Tensile strength, Chemical components.*

1. Pendahuluan

Sel merupakan unit satuan dasar kehidupan yang berperan secara fisiologis dan struktural dalam setiap aktivitas makhluk hidup. Berbeda dengan sel-sel pada binatang, sel pada tumbuhan dikelilingi oleh dinding sel yang tebal dan rigid. Dinding sel pada tumbuhan memiliki struktur yang kompleks dan berlapis-lapis untuk membangun kekuatan dan rigiditasnya. Karena tumbuhan tidak memiliki tulang, dinding sel berfungsi struktural untuk menahan beban dan mempertahankan bentuknya. Dinding sel pada tumbuhan berkayu tersusun atas holoselulosa dan lignin. Untaian holoselulosa yang terdiri atas selulosa dan hemiselulosa direkatkan oleh lignin. Lignin merupakan polimer alami yang sangat heterogen dengan struktur molekul yang sangat kompleks sehingga memungkinkan terjadinya berbagai macam ikatan kimia di antara setiap molekulnya. Lignin menyatukan untaian holoselulosa sehingga dinding sel tumbuhan berkayu menjadi jauh lebih kuat dan kaku.

Komponen kimia dinding sel, yaitu holoselulosa (selulosa dan hemiselulosa) dan lignin merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan. Peningkatan kandungan lignin tentu menurunkan kandungan holoselulosa pada dinding sel. Peningkatan kandungan salah satu komponen (lignin ataupun holoselulosa) diduga tidak selalu meningkatkan kekuatan seratnya. Sebagai gambaran ekstrim, dinding sel yang seluruhnya terdiri atas holoselulosa tanpa lignin tentu lebih mudah putus dibandingkan yang disatukan oleh lignin karena ketiadaan efek saling penyokongan. Sebaliknya, 100% lignin tanpa holoselulosa tidak dapat membentuk dinding sel sehingga tidak memiliki kekuatan tarik sama sekali. Sesuai dengan landasan pemikiran tersebut maka dapat dipahami bahwa ada suatu titik komposisi tertentu di mana dinding sel terkuat dapat dicapai. Dalam bahasa matematika, titik tersebut disebut titik balik maksimum. Perubahan komposisi dinding sel sehingga berubah posisi dari titik balik maksimum pasti menurunkan kekuatannya. Kurva paling sederhana yang memiliki titik balik antara lain adalah kurva parabola yang dibangun dari persamaan kuadratik sehingga regresi polynomial berderajat dua (kuadratik) dipilih untuk menduga pengaruh kandungan kimia dinding sel terhadap kekuatan tarik bambu. Selanjutnya, karena peningkatan kandungan lignin tentu menurunkan kandungan holoselulosa ($\text{Holoselulosa} + \text{Lignin} \cong 100\%$) dapat dipastikan bahwa terjadi autokorelasi di antara kedua peubah sehingga dipilih salah satu yaitu kandungan lignin sebagai peubah bebas dalam penelitian ini.

Holosellusa merupakan fraksi polisakarida yang tersusun atas selulosa dan hemiselulosa. Selulosa merupakan polisakarida yang tersusun atas sejumlah

besar β -1,4-linked *glucan* yang saling berinteraksi membentuk mikrofibril kristalin melalui ikatan hidrogen (Somerville, 2006). Selulosa merupakan polimer linier dengan derajat polimerasi tinggi. Struktur kimia selulosa adalah $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Selain selulosa, pada dinding sel juga terdapat polisakarida hemiselulosa yaitu *xyloglucans*, *glucomannans*, *xylans*, dan *mixed-linkage glucans* (Scheller dan Ulvskov, 2010). Struktur kimia hemiselulosa lebih heterogen daripada selulosa. Hemiselulosa mengisi ruang antara serat-serat selulosa dan dominan pada daerah *amorph* karena bentuk molekulnya yang lebih kompleks. Sebagai polimer linier berantai panjang, selulosa memberikan sumbangan kekuatan serat yang lebih besar daripada hemiselulosa (Sjostrom, 1991). Kandungan selulosa yang tinggi dalam holoselulosa diduga dapat meningkatkan kekuatan serat sehingga rasio kandungan selulosa dibandingkan holoselulosa dipilih sebagai salah satu variabel penduga kekuatan tarik bambu dalam penelitian ini.

Sifat mekanis suatu material komposit tidak hanya tergantung pada komposisi bahan baku tetapi juga pada formasi dan mekanisme pembentukan bahan baku menjadi satu kesatuan material yang utuh. Bambu merupakan salah satu contoh material komposit alami yang tersusun atas beraneka ragam sel. Formasi sel di ruas bambu sangat berbeda dengan di buku. Ruas bambu didominasi oleh serat-serat yang lurus dan panjang, sedangkan serat-serat di buku sebagian berbelok ke dalam dan sebagian kecil keluar. Sel-sel pada bambu yang berfungsi struktural bersama-sama membentuk ikatan pembuluh (*vascular bundles*) sedangkan sel-sel yang memiliki fungsi fisiologis (a.l. parenkim) tersebar di seluruh bagian bambu. Jumlah *vascular bundles* per satu satuan luas penampang atau proporsi luas penampang *vascular bundles* terhadap luas total diduga berpengaruh terhadap kekuatan tarik bambu.

2. Metodologi

Bambu yang sudah masak tebang, masing-masing tiga batang dari 5 (lima) jenis terpilih ditebang dari arboretum bambu Institut Pertanian Bogor. Lima jenis bambu tersebut adalah ampel (*Bambusa vulgaris*), andong (*Gigantochloa pseudoarundinaceae*), betung (*Dendrocalamus asper*), mayan (*Gigantochloa robusta*), dan tali (*Gigantochloa apus*). Bambu dipilih yang tua yaitu yang berada di bagian terdalam di rumpunnya, kulitnya berbintik-bintik dan warnanya kusam, serta seludangnya sudah terlepas dari batang. Pada penelitian ini, contoh uji diambil dari batang bagian tengah saja.

2.1 Anatomi bambu

Pengamatan anatomi bambu dilakukan di Laboratorium Peningkatan Mutu Kayu Fakultas Kehutanan IPB.

Anatomi bambu diamati di bawah mikroskop digital dengan perbesaran 10x. Contoh uji yang diamati diambil dari bagian tengah batang bambu tepat di buku dan di ruasnya. Pengamatan dilakukan pada 3 (tiga) penampang yaitu bidang lintang, radial, dan tangensial. Foto mikroskop selanjutnya diolah dengan perangkat lunak Motic Image Plus 2.0 ML untuk mengukur diameter dan luas penampang ikatan vaskular. Luas penampang ikatan vaskular dihitung dengan **Persamaan 1** yang merupakan rumus luas elips.

$$A = \pi ab \quad (1)$$

dimana :

A = luas penampang (mm^2)

a = sumbu mayor (jari-jari terpanjang) (mm)

b = sumbu minor (jari-jari terpendek) (mm)

Proporsi luas ikatan pembuluh adalah luas total pembuluh dibagi dengan luas total bidang bambu yang terfoto. Jumlah ikatan pembuluh per satuan luas juga dihitung.

2.2 Komponen kimia dinding sel bambu

Pengukuran kandungan komponen kimia bambu dilakukan di Laboratorium Kimia Hasil Hutan Fakultas Kehutanan IPB. Kandungan kimia bambu yang diukur meliputi lignin, selulosa, dan hemiselulosa.

2.2.1 Serbuk bebas ekstraktif

Batang bambu dipotong dan dipisahkan bagian buku dan bagian ruasnya. Potongan bambu tersebut dicacah lalu digiling dengan *Willey mill* dan disaring sehingga diperoleh serbuk 40 – 60 mesh. Dari serbuk yang dihasilkan kemudian diambil 2 gram untuk diukur kadar airnya. Serbuk sebanyak 2 (dua) gram tersebut ditempatkan pada cawan porselen yang telah ditimbang beratnya kemudian dioven dengan suhu 103 ± 2 °C selama 24 jam untuk menguapkan seluruh kandungan air dalam serbuk. Setelah dikeluarkan dari oven, contoh uji dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit dan ditimbang. Kadar air (M_c) dihitung dengan **Persamaan 2**:

$$M_c = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_p} \times 100\% \quad (2)$$

dimana :

M_c = Kadar air (%)

W_1 = Berat contoh uji (serbuk dan porselen) sebelum dioven (gram)

W_2 = Berat contoh uji (serbuk dan porselen) sesudah dioven (gram)

W_p = Berat porselen (gram)

Pengujian kandungan komponen kimia bambu harus dilakukan dalam keadaan bebas ekstraktif. Oleh karena

itu serbuk bambu diekstraksi terlebih dahulu dengan metode sokhletasi menggunakan 300 ml campuran pelarut etanol – benzene (1 : 2) selama 6 – 8 jam sehingga pelarut dalam sokhlet berwarna bening. Proses ekstraksi dilanjutkan dengan menggunakan pelarut etanol selama 4 jam, kemudian diekstraksi menggunakan air panas selama 3 jam. Setelah ekstraksi, contoh uji dicuci dengan 500 ml aquades panas untuk menghilangkan pelarut. Serbuk bebas ekstraktif dikeringkan dalam oven bersuhu 103 ± 2 °C hingga beratnya konstan. Kandungan zat ekstraktif dalam serbuk kering bambu dihitung dengan **Persamaan 3**. Untuk menghindari penyerapan air, serbuk bambu kering bebas ekstraktif disimpan dalam wadah tertutup rapat.

$$E = \frac{W_e}{W_s(1 - 0.01M_c)} \times 100\% \quad (3)$$

dimana :

E = Kandungan zat ekstraktif (%)

M_c = Kadar air (%)

W_e = Berat zat ekstraktif (gram)

W_s = Berat serbuk (gram)

2.2.2 Kandungan lignin

Pengujian kandungan lignin dilakukan berdasarkan prosedur TAPPI 222 om 88. Sejumlah 0.5 gram serbuk bambu kering yang sudah bebas dari zat ekstraktif dimasukkan ke dalam gelas piala lalu berangsur-angsur ditambahkan larutan asam sulfat 72% hingga sebanyak 5 ml. Penambahan asam sulfat dilakukan sambil diaduk perlahan-lahan dan suhu dijaga konstan pada 2 ± 1 °C dengan cara merendam gelas piala dalam penangas berisi air dingin. Setelah tercampur sempurna, gelas piala disimpan pada suhu 20 ± 1 °C selama 3 jam dan sesekali diaduk perlahan setiap ± 15 menit. Setelah 3 jam, sebanyak 191 ml aquades dimasukkan dalam gelas piala sehingga konsentrasi larutan asam sulfat menjadi 3%. Hidrolisis dilakukan menggunakan *autoclave* dengan suhu 121 °C selama 30 menit. Lignin dicuci dengan aquades panas hingga bebas asam lalu disaring dengan kertas saring. Lignin dikeringkan dalam oven bersuhu 103 ± 2 °C hingga beratnya konstan. Kandungan lignin dalam dinding sel dihitung dengan **Persamaan 4**.

$$L = \frac{W_L}{W_{po}} \times 100\% \quad (4)$$

dimana :

L = Kandungan lignin (%)

W_L = Berat kering lignin (gram)

W_{po} = Berat kering serbuk bambu bebas ekstraktif ($W_{po} = 0.5$ gram)

2.2.3 Kandungan holoselulosa (selulosa dan hemiselulosa)

Kandungan holoselulosa dilakukan mengikuti prosedur Browning (1967). Serbuk bambu kering bebas zat ekstraktif sebanyak 2 gram dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer 250 ml, lalu ditambahkan 80 ml aquades, 1 gram sodium klorit, dan 0.5 ml asam asetat glacial. Campuran tersebut lalu dipanaskan dalam *waterbath* pada suhu 70 °C. Satu jam kemudian, ke dalam contoh uji ditambahkan 1 gram sodium klorit dan 0.5 ml asam asetat glacial. Penambahan tersebut diulangi setiap 1 jam reaksi sampai lima kali penambahan. Holoselulosa disaring dengan kertas saring yang telah ditimbang sebelumnya lalu dibilas dengan air destilata panas. Setelah filtrat menjadi bening, ditambahkan 25 ml asam asetat 10%, kemudian dibilas lagi hingga bebas asam. Contoh uji lalu dioven pada suhu 103 ± 2 °C hingga beratnya konstan. Kadar holoselulosa dihitung dengan **Persamaan 5**.

$$H_o = \frac{W_{Ho}}{W_p} \times 100\% \quad (5)$$

dimana :

- H_o = Kandungan holoselulosa (%)
- W_{Ho} = Berat kering holoselulosa (gram)
- W_{po} = Berat kering serbuk bambu bebas ekstraktif ($W_{po} = 5$ gram)

Serbuk holoselulosa kemudian digunakan untuk pengujian kandungan selulosa sesuai dengan metode Browning (1967). Serbuk holoselulosa sebanyak 2 gram dimasukkan ke dalam Erlenmeyer 250 ml, kemudian larutan NaOH 17.5% sebanyak 16 ml ditambahkan dan diaduk pada suhu 20 °C. Pada waktu reaksi 5, 10, dan 15 menit, ditambahkan 5 ml larutan NaOH 17.5% dan dibiarkan hingga total waktu 45 menit. Contoh uji disaring dan dibilas dengan menggunakan 125 ml NaOH 8% selama 5 menit, lalu disaring lagi dengan menggunakan kertas saring dan dibilas dengan aquades. Setelah filtrat berwarna bening, contoh uji dibilas dengan 50 ml asam asetat 10% dan ducuci dengan air hingga bebas asam. Contoh uji dikeringkan dalam oven bersuhu 103 ± 2 °C. Kandungan selulosa dalam dinding sel dihitung dengan **Persamaan 6**, sehingga rasio kandungan selulosa terhadap holoselulosa dapat dihitung dengan **Persamaan 7**. Kandungan hemiselulosa dalam dinding sel bambu dihitung dengan **Persamaan 8**.

$$\alpha = \frac{W_\alpha}{W_{Ho}} H_o \times 100\% \quad (6)$$

$$\frac{\alpha}{H_o} = \frac{W_\alpha}{W_{Ho}} \times 100\% \quad (7)$$

$$H_e = H_o - \alpha \quad (8)$$

dimana :

- H_o = Kandungan holoselulosa (%)
- a = Kandungan selulosa (%)
- H_e = Kandungan hemiselulosa (%)
- W_a = Berat selulosa (gram)
- W_{Ho} = Berat kering serbuk holoselulosa (gram)

2.3 Kekuatan tarik bambu

Pengujian kekuatan tarik bambu dilakukan di Laboratorium Keteknikan Kayu, Bagian Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu, Fakultas Kehutanan IPB. Kekuatan tarik bambu diuji pada ruas dan buku. Contoh uji diambil dari bagian tengah bambu dengan ukuran panjang 30 cm dan lebar 2 cm sedangkan tebalnya mengikuti tebal bilah bambu. Di bagian tengah contoh uji digentingkan sehingga lebarnya menjadi 3 mm. Untuk contoh uji buku, penggentingan dilakukan tepat di bagian buku. Contoh uji diuji tarik dengan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) merk Instron 3695 sesuai dengan prosedur ASTM D 143, sehingga kerusakan terjadi tepat di daerah yang digentingkan. Jika kerusakan terjadi di luar daerah yang digentingkan, maka data dianggap tidak valid dan pengujian tarik diulang lagi dengan contoh uji yang baru. Kekuatan tarik bambu dihitung dengan **Persamaan 9**.

$$\sigma_t = \frac{P_{max}}{A} \quad (9)$$

dimana :

- σ_t = Kekuatan tarik sejajar serat (kg/cm^2)
- P_{max} = Beban maksimum (kg)
- A = Luas penampang daerah yang digentingkan (cm^2)

2.4 Pemilihan variabel sifat kimia yang mempengaruhi kuat tarik bambu

Analisa data dilakukan dengan menggunakan *best subset regression* dengan model lengkap mula-mula adalah **Persamaan 10**.

$$\sigma_t = a + b_1z + b_2L + b_3zL + b_4L^2 + b_5zL^2 + b_6\frac{\alpha}{H_o} + b_7z\frac{\alpha}{H_o} + b_8V + b_9\frac{V}{A} + \varepsilon \quad (10)$$

dimana :

- σ_t = Kekuatan tarik sejajar serat (kg/cm^2)
- z = Peubah boneka yang bernilai biner (buku = 0, ruas = 1)
- L = Kandungan lignin (%)
- a/H_o = Proporsi selulosa terhadap holoselulosa (%)
- V = Jumlah ikatan pembuluh ($/\text{mm}^2$)
- V/A = Proporsi ikatan pembuluh (%)
- a = Konstanta
- b_1, b_2, \dots, b_9 = koefisien regresi
- ε = sisaan

Uji korelasi antar peubah, baik peubah bebas maupun tak bebas dilakukan sebelum prosedur *best subset regression* dijalankan. Model terbaik dipilih dengan kriteria nilai *Adjusted-R²* terbesar dengan jumlah peubah bebas yang masih dapat diterima maksimum adalah 6 buah.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Ikatan pembuluh pada bambu

Bambu merupakan komposit alami dengan jaringan dasar yang tersusun atas sel-sel parenkim, dimana di antaranya (*embedded*) terdapat ikatan pembuluh yang mengandung sel-sel fiber yang berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*). Yu *et al.* (2007) melaporkan bahwa dinding sel fiber pada bambu memiliki modulus elastisitas (E) 17 GPa dan kekerasan 370 MPa, jauh lebih tinggi daripada dinding sel parenkim (E = 5.8 GPa dan hardness 230 MPa). Karena sifat-sifat mekanis dinding selnya yang sangat tinggi dibandingkan sel-sel lainnya, sel-sel fiber berperan utama sebagai penyokong bambu agar mampu menahan beban dan mempertahankan bentuknya. Sel-sel fiber terikat menjadi satu kesatuan dalam ikatan pembuluh bersama-sama dengan beberapa sel lainnya. Ikatan pembuluh merupakan gabungan dari beberapa sel yaitu untaian fiber (*fiber strand*), parenkim, selubung sklerenkim (*sclerenchyma sheaths*), phloem, metaxylem (*vessel*) dan elemen metaxylem yang lebih kecil, serta saluran intra-seluler yang diperkuat oleh sisa-sisa protoxylem (Liese, 1985). Ikatan pembuluh terbungkus dalam matriks sel-sel parenkim.

Seperti terlihat pada penampang tangensial dan radial (**Gambar 1**), ikatan pembuluh di bagian ruas (*internode*) berbentuk lurus pada arah batang dan tersusun sejajar, sedangkan pada buku (*node*) sebagian lurus namun ada pula yang bercabang dan berbelok ke arah dalam maupun tepi. Bagian buku menjadi bagian akhir (ujung dan pangkal) dari sebagian ikatan pembuluh. Jalinan sel pada bagian buku lebih kompleks daripada bagian ruas karena keberadaan bekas seludang daun (*sheat scars*), akar, tunas, dan cabang.

Seperti terlihat pada penampang lintang (**Gambar 1**), jumlah ikatan pembuluh bervariasi dari tepi hingga ke bagian terdalam dari bambu baik di bagian buku maupun ruas. Secara umum, jumlah ikatan pembuluh di bagian tepi lebih banyak daripada bagian dalam sehingga bagian tepi dapat lebih kuat daripada bagian dalam. Komposisi bagian terkuat di bagian tepi dan terlemah di bagian dalam memaksimalkan momen inersia penampang buluh bambu sehingga meningkatkan kemampuannya menahan momen lentur. Tanaman bambu yang tertiuap angin kencang tidak mudah roboh karena dapat bertindak mirip dengan balok bermomen inersia tinggi yang menerima beban lentur dengan konfigurasi kantilever.

Bentuk ikatan pembuluh di bagian buku juga tampak berbeda dibandingkan bagian ruas seperti terlihat pada sketsa **Gambar 2**. Pada buku, untaian serat di dalam ikatan pembuluh lebih besar pada posisi dekat tepi dibandingkan pasangannya yang di arah dalam. Kondisi ini berbalik di bagian ruas di mana untaian serat di dekat tepi lebih kecil dibandingkan pasangannya di bagian dalam. Kecenderungan yang sama terjadi pada lima jenis bambu yang diamati.

Jumlah ikatan pembuluh dapat bervariasi pada tiap-tiap jenis bambu (**Gambar 3a**). Namun pada penelitian ini, jumlah ikatan pembuluh dari lima jenis bambu yang diteliti tidak menunjukkan perbedaan yang nyata secara statistik, meskipun dalam **Gambar 3a** terlihat variasinya. Jumlah ikatan pembuluh terkecil yaitu pada bambu ampel (*internode* = 3.34; *node* = 4.27) tidak berbeda nyata dengan yang terbesar yaitu *internode* mayan (6.49) dan *node* betung (5.81). Hal serupa terjadi pula pada peubah proporsi ikatan pembuluh (**Gambar 3b**).

3.2 Komponen kimia dinding sel bambu

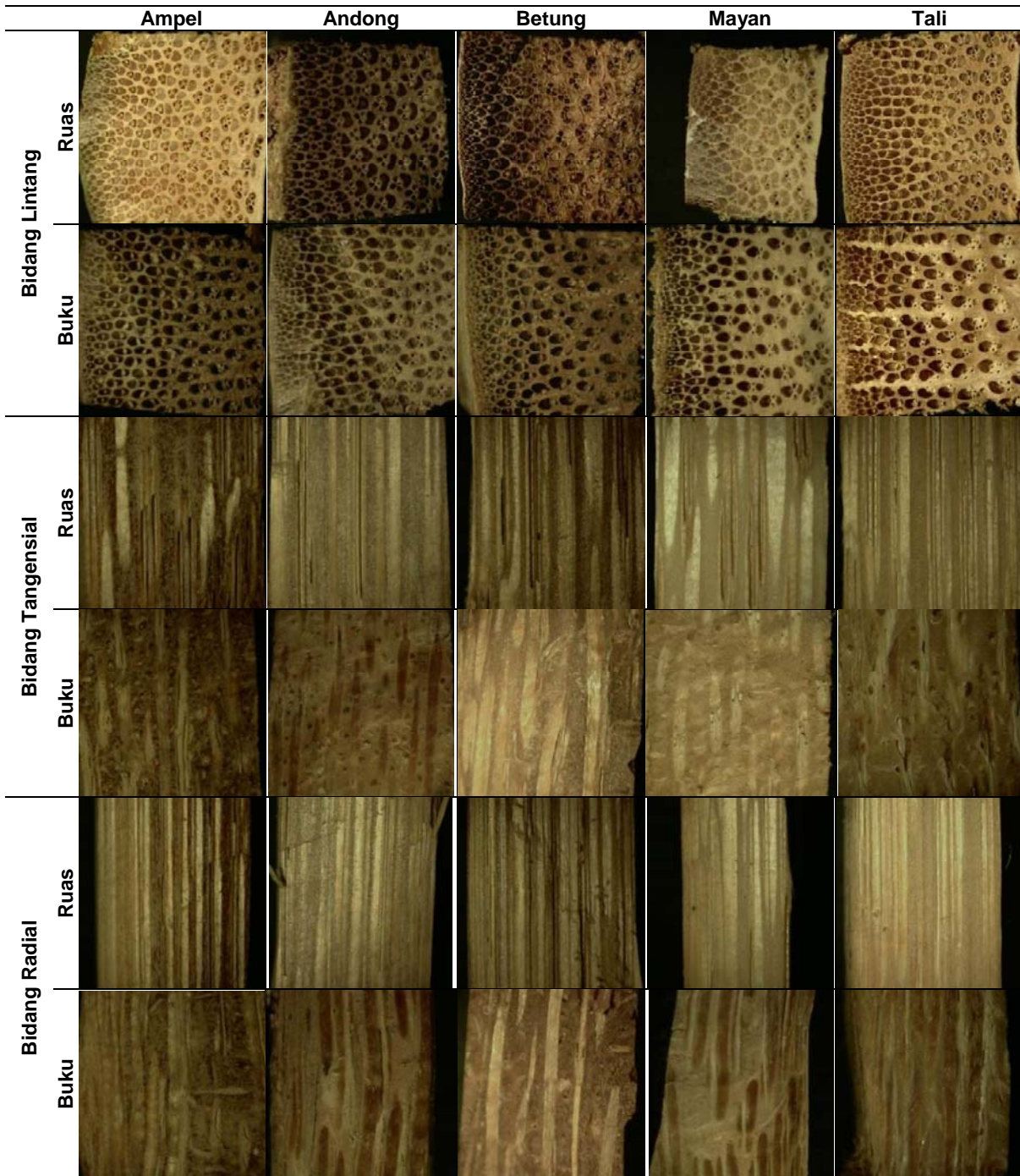
Komponen kimia dinding sel bambu terdiri atas lignin dan holoselulosa. Kandungan lignin pada setiap jenis bambu bervariasi dari 20 – 33% (**Gambar 4a**). Kandungan lignin bambu ampel bagian ruas adalah paling rendah, tetapi di bagian buku merupakan tertinggi dibandingkan jenis lainnya. Seperti terlihat pada **Gambar 4a**, kandungan lignin pada buku umumnya lebih tinggi daripada bagian ruas, namun perbedaan ini tidak nyata secara statistik. Hal serupa juga terjadi pada kandungan holoselulosa. Kandungan holoselulosa bambu bervariasi dari 52 – 80%, namun perbedaan kandungan holoselulosa antar jenis dan posisi (*node* atau *internode*) tidak signifikan.

Holoselulosa terdiri atas selulosa (alpha selulosa) dan hemiselulosa. Proporsi alpha selulosa terhadap holoselulosa bervariasi dari 50 – 61% di bagian ruas dan 46 – 77% di bagian buku (**Gambar 4b**) sehingga secara statistik tidak berbeda nyata. Demikian pula dengan proporsi alpha selulosa terhadap holoselulosa antar jenis bambu juga tidak menunjukkan perbedaan yang nyata.

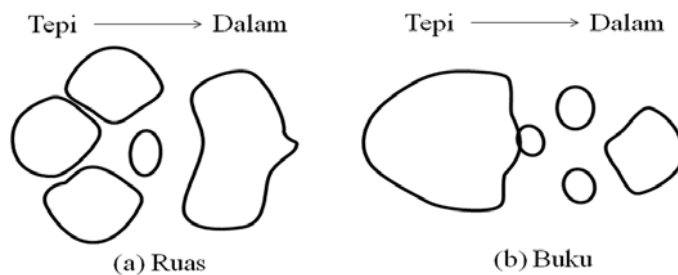
Pada pori dan rongga antar sel terdapat zat ekstraktif yang dapat dilarutkan dengan air panas maupun alkohol benzena. Zat ekstraktif tidak berperan pada kekuatan bambu, tetapi berpengaruh terhadap keawetannya, contohnya karbohidrat pada bambu merupakan bahan pakan bagi kumbang sehingga bambu diserang oleh kumbang. Kandungan zat ekstraktif pada kelima jenis bambu disajikan pada **Gambar 5**.

3.3 Kekuatan tarik bilah bambu

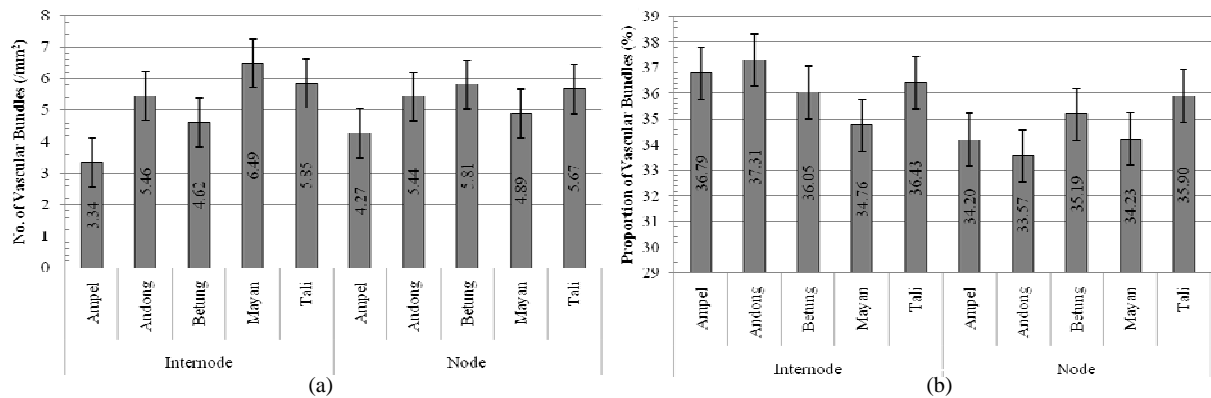
Kekuatan tarik bilah bambu bagian ruas secara umum lebih tinggi daripada bagian buku. Perbedaan tersebut cukup signifikan secara statistik sebagaimana disajikan



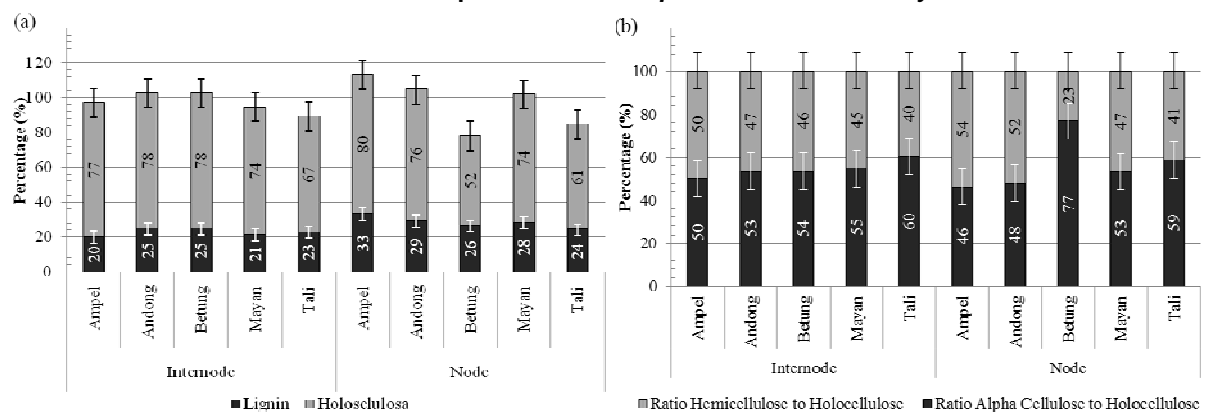
Gambar 1. Penampang bambu pada bidang lintang, tangensial dan radial di bagian buku dan ruas



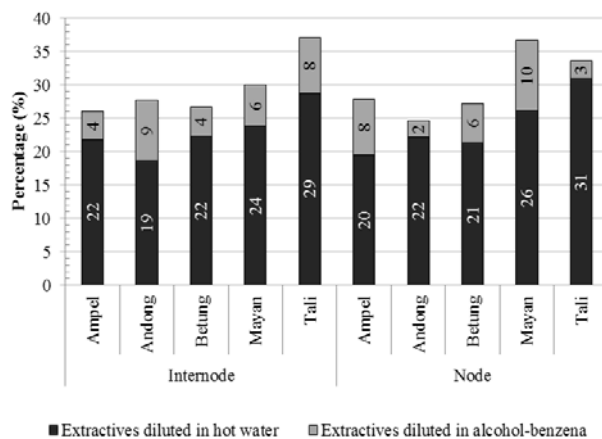
Gambar 2. Ikatan pembuluh pada ruas (a): untaian serat (*fiber strands*) di arah dalam lebih besar daripada pasangannya di arah tepi; dan pada buku (b): polanya berlawanan



Gambar 3. Rata-rata jumlah (a) dan proporsi (b) ikatan pembuluh
Catatan: error bar dipilih nilai mean square error dari two way anova



Gambar 4. Komposisi kimia dinding sel bambu: kandungan lignin dan holoselulosa (a), dan proporsi alpha selulosa dan hemicelulosa di dalam holoselulosa (b)
(catatan: error bar menunjukkan mean square error dari two way anova)



Gambar 5. Kandungan zat ekstraktif larut air panas dan alkohol - benzene pada lima jenis bambu

pada hasil uji Tukey (Tabel 1). Demikian pula setiap jenis bambu juga menunjukkan perbedaan kuat tarik yang signifikan (Tabel 2). Bambu andong merupakan jenis yang memiliki kekuatan tarik tertinggi diikuti oleh betung, tali, dan mayan. Sedangkan kekuatan tarik bambu ampel adalah yang terendah. Seperti terlihat pada Tabel 3, kekuatan tarik terbesar terjadi pada ruas bambu betung dan yang terkecil adalah buku

bambu mayan. Berbeda dengan keempat jenis lainnya, buku bambu ampel rata-rata memiliki kekuatan tarik lebih besar daripada ruasnya meskipun tidak nyata secara statistik karena masih berada dalam satu kelompok (Group C). Sedangkan keempat jenis lainnya (andong, betung, tali, dan mayan) bagian ruasnya lebih mampu menahan tarik daripada buku. Untuk bambu betung, tali, dan mayan bagian ruas lebih kuat secara signifikan dibanding bukunya, sedangkan kekuatan tarik bagian ruas bambu andong dan ampel tidak berbeda nyata dibandingkan bagian bukunya. Perbedaan kekuatan tarik dapat terjadi akibat variasi struktur anatomi dan komposisi komponen kimia dinding sel bambu.

Tabel 1. Uji Tukey menunjukkan perbedaan kuat tarik bambu di bagian ruas dan buku

Category	Mean	Groups
Internode (Ruas)	2582	A
Node (Buku)	1789	B

Tabel 2. Uji Tukey menunjukkan perbedaan kuat tarik lima jenis bambu

Category	Means	Groups		
Andong	2782	A		
Betung	2618	A	B	
Tali	2227	A	B	C
Mayan	1728		B	C
Ampel	1573			C

Tabel 3. Uji Tukey menunjukkan perbedaan kuat tarik lima jenis bambu pada buku dan ruas (interaksi jenis dengan buku/ruas)

Category	Means	Groups		
Ruas * Betung	3472	A		
Ruas * Andong	3058	A	B	
Ruas * Tali	2857	A	B	
Buku * Andong	2506	A	B	C
Ruas * Mayan	2488	A	B	C
Buku * Ampel	2110	A	B	C
Buku * Betung	1765		B	C
Buku * Tali	1598		B	C
Ruas * Ampel	1037			C
Buku * Mayan	968			C

3.4 Pengaruh ikatan pembuluh dan komponen kimia dinding sel terhadap kekuatan tarik bilah bambu

Bambu tersusun atas sel-sel struktural yang terikat dalam ikatan pembuluh dan sel-sel parenkim yang tersebar di sekitarnya. Jumlah ikatan pembuluh per satuan luas (V) atau proporsi luasnya (V/A) diduga berpengaruh terhadap kekuatan tarik bilah bambu karena ikatan pembuluh merupakan penyumbang kekuatan terbesar dalam satu bilah bambu. Dinding sel setiap jenis bambu dapat terbuat dari bermacam-macam variasi komposisi lignin (L) dan holoselulosa (H_o). Holoselulosa dapat dianggap sebagai serabut-serabut yang menjadi tulang dari dinding sel, sedangkan lignin merupakan perekat (*cement*) yang menyatukan untaian holoselulosa tersebut. Oleh karena kandungan dinding sel hampir seluruhnya adalah lignin dan holoselulosa, semestinya terdapat korelasi negatif yang kuat di antara keduanya. Peningkatan kandungan lignin tentu diikuti dengan penurunan kandungan holoselulosa. Holoselulosa terdiri atas dua komponen polysakarida yaitu alpha-selulosa dan hemiselulosa. Sebagai polysakarida berantai panjang, alpha-selulosa memiliki kekuatan tarik yang lebih besar dibandingkan hemiselulosa. Alpha-selulosa membentuk untaian linier yang dominan menyusun daerah kristalin yang saling terikat melalui ikatan hidrogen. Struktur hemiselulosa

memiliki rantai polisakarida yang lebih pendek dengan bentuk ikatan lebih kompleks sehingga kekuatan tariknya lebih rendah dibanding alpha-selulosa. Peningkatan proporsi alpha-selulosa terhadap holoselulosa (a/H_o) diduga dapat meningkatkan kekuatan tarik bilah bambu. Bambu berbentuk buku-buku seperti tabung yang dihubungkan oleh ruas. Formasi sel di ruas bambu sangat berbeda dengan di buku. Ruas bambu didominasi oleh serat-serat yang lurus dan panjang, sedangkan serat-serat di buku sebagian berbelok ke dalam dan sebagian kecil keluar. Perbedaan formasi di buku dan ruas (z) ini dapat mempengaruhi kekuatan tarik bilah bambu. Lima besaran yaitu ruas/buku (z), kandungan lignin (L), rasio alpha selulosa terhadap holoselulosa (a/H_o), jumlah ikatan pembuluh (V), dan jumlah ikatan pembuluh per satuan luas (V/A), beserta empat besaran transformasinya (zL , L^2 , zL^2 , dan za/H_o) dicoba untuk mengepas kekuatan tarik lima jenis bambu yang diteliti. Korelasi antara kesembilan variabel bebas tersebut dengan kekuatan tarik bambu disajikan pada **Tabel 4**. Seperti terlihat pada **Tabel 4**, kandungan lignin pada bambu bagian ruas secara linier maupun kuadratik memiliki koefisien korelasi terbesar dengan kekuatan tarik yaitu masing-masing 0.571 dan 0.633. Rasio alpha-selulosa terhadap holoselulosa di bagian ruas juga berkorelasi cukup erat dengan kekuatan tarik. Sementara itu di bagian buku, setiap variabel tunggal terpilih ternyata tidak mampu menjelaskan kekuatan tarik bilah bambu karena koefisien korelasinya rendah. Pengujian *best subset regression* dengan menggunakan semua variabel terpilih selanjutnya dilakukan dan menghasilkan beberapa model terbaik sebagaimana disajikan pada **Tabel 5**. Model dalam **Tabel 5** merupakan tiga model terbaik dari regresi dengan menggunakan sebanyak-banyaknya 6 variabel bebas. Berdasarkan kriteria terpilih yaitu *Adjusted-R²* tertinggi maka dapat dinyatakan bahwa model dengan 3 variabel bebas yaitu kandungan lignin (L), kuadrat kandungan lignin pada ruas (zL^2), dan jumlah ikatan pembuluh (V) merupakan model terbaik dari semua model yang dicoba dengan nilai *Adjusted-R²* sebesar 73.57%. *Best subset regression* menghasilkan persamaan terbaik yaitu **Persamaan 11**, dengan nilai-nilai statistik disajikan pada **Tabel 6**. Sedangkan grafik hubungan antara estimasi kekuatan tarik dengan nilai observasi (empiris)-nya disajikan pada **Gambar 6**.

$$\hat{\sigma}_t = -4661.27 + 154.06L + 3.27zL^2 + 398.94V \quad (11)$$

Tabel 4. Korelasi antara variabel bebas dengan kekuatan tarik bilah bambu

Variables	z	L	zL	L^2	zL^2	a/H_o	za/H_o	V	V/A
Tensile Strength	0.496	-0.026	0.571	-0.046	0.633	-0.074	0.527	0.350	0.226

Tabel 5. Ringkasan seleksi variabel dalam best subset regression

No. of Variables	Variables	MSE	R ²	Adjusted R ²	Mallows' Cp	Akaike's AIC	Schwarz's SBC	Amemiya's PC
2	$z; zL$	290127	0.6822	0.5914	-1.5325	128.2140	129.1217	0.4591
3	$L; zL^2; V$	187651	0.8238	0.7357	-0.6321	124.3151	125.5255	0.3084
4	$z; zL; zL^2; V$	211583	0.8344	0.5654	1.2853	125.6923	127.2052	0.3548

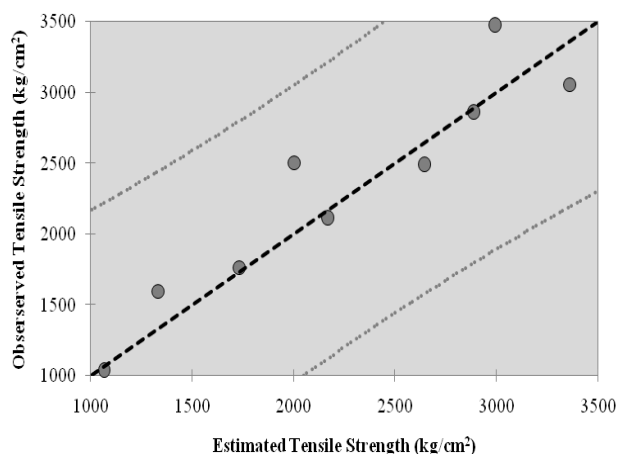
Catatan: Model terbaik disajikan dengan huruf tebal

Table 6. Statistik koefisien regresi dari model terbaik

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-4661.27	1686.12	-2.7645	0.0327	-8787.05	-535.48
L	154.06	47.88	3.2176	0.0182	36.90	271.21
zL^2	3.27	0.67	4.8844	0.0028	1.63	4.91
V	398.94	159.55	2.5004	0.0465	8.53	789.35

Persamaan terbaik terpilih tidak mengandung variabel rasio alpha-selulosa per holoselulosa di ruas bambu ($z\alpha/H_o$) meskipun variabel tersebut berkorelasi erat dengan kekuatan tarik. Hal ini terjadi karena $z\alpha/H_o$ juga berkorelasi erat dengan kandungan lignin (L) dan kuadrat kandungan lignin pada ruas (zL^2) yaitu masing-masing 0.730 dan 0.974. Meskipun rasio alpha-selulosa per holoselulosa memiliki peranan penting pada kekuatan tarik bambu, peranan tersebut tidak terbaca oleh model *best subset regression* karena memiliki autokorelasi dengan dua variabel bebas lainnya. Kandungan lignin bersama-sama dengan jumlah ikatan pembuluh merupakan variabel penentu bagi kekuatan tarik bilah bambu. Hal ini sejalan dengan Winandhi dan Rowel (1984) yang melaporkan bahwa kekuatan serat lebih dominan ditentukan oleh kandungan lignin dan selulosa daripada hemiselulosa. Kekuatan serat meningkat seiring dengan semakin besarnya kandungan lignin dan selulosa.

Seperti terlihat pada **Persamaan 11** dan **Tabel 6**, koefisien regresi bagi ketiga variabel bebas bernilai positif. Hal ini berarti peningkatan kekuatan tarik bilah bambu terjadi seiring dengan meningkatnya kandungan lignin dan jumlah ikatan pembuluh. Pada ruas bambu peningkatan kandungan lignin memberikan peningkatan kekuatan tarik dengan derajat yang lebih tinggi yaitu kuadratik, sedangkan pada buku hanya linier. Pada seluruh selang yang diperoleh dalam penelitian ini titik balik maksimum sebagaimana dihipotesiskan tidak dapat ditemukan. Kandungan lignin dinding sel hingga titik tertinggi yang ditemukan (33%) masih meningkatkan kekuatan tarik bilah bambu.



Gambar 6. Hubungan antara nilai estimasi kekuatan tarik bilah bambu dengan nilai observasinya

4. Kesimpulan

Kekuatan tarik bambu dipengaruhi oleh jumlah ikatan pembuluh, kandungan komponen kimia, dan bagian node/internode:

1. Semakin banyak jumlah ikatan pembuluh per satu satuan luas, maka kekuatan tarik bambu semakin besar.
2. Kandungan lignin meningkatkan kekuatan tarik pada bagian ruas secara proporsional (linier). Sedangkan kekuatan tarik pada bagian buku meningkat secara kuadratik seiring dengan peningkatan kandungan lignin.
3. Tingginya nilai korelasi kekuatan tarik dengan proporsi alpha selulosa terhadap holoselulosa pada bagian ruas memperlihatkan pentingnya peranan proporsi alpha selulosa pada kekuatan tarik bambu.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Bagian Rekayasa dan Desain Bangunan Kayu Fakultas Kehutanan IPB yang telah mengizinkan penulis untuk menggunakan UTM Instron 3695 untuk pengujian tarik. Terima kasih juga disampaikan kepada Bagian Peningkatan Mutu Kayu dan Bagian Kimia Hasil Hutan yang memfasilitasi pengamatan anatomi dan pengujian komponen kimia bambu.

Daftar Pustaka

- ASTM D143-94(2000)e1, 2000, *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. doi: 10.1520/D0143-94R00E01.
- Browning, B.L., 1967, *Methods of Wood Chemistry, Vol. II*. New York: Wiley-Interscience Publishers.
- Liese, W., 1985, *Anatomy and Properties of Bamboo. Proceeding of International Bamboo Workshop (China)*, 6-14 October 1985, pp. 198 – 208.
- Scheller, H.V. dan Ulvskov P., 2010, *Hemicelluloses*. Annu. Rev. Plant. Biol.61, pp. 263-89. doi: 10.1146/annurev-arplant-042809-112315.

- Sjöström, E., 1991, *Carbohydrate Degradation Products from Alkaline Treatment of Biomass*. Biomass and Bioenergy, Vol.1, No.1, pp. 61-64.
- Somerville, C., 2006. *Cellulose Synthesis in Higher Plants*, Annu. Rev. Cell Dev. Biol. Vol.22, pp. 53-78. doi: 10.1146/annurev.cellbio.22.022206.160206
- Tappi Method T 222 om-88, 1988, *Acid-in Soluble Lignin in Wood and Pulp*, Atlanta, GA: TAPPI PRESS.
- Winandhi J.E., dan Rowell, R., 1984, *Chemistry of Wood Strength*, in: Rowell R. Editor, Washington, USA: The Chemistry of Solid Wood, American Chemical Society, pp. 211-255.
- Yu, Y., Fei, B., Zhang, B., dan Yu, X., 2007. *Cell-wall Mechanical Properties of Bamboo Investigated by in-situ Imaging Nano Indentation*, Wood and Fiber Science, Vol. 39, No.4, pp. 527 – 535.