

# Kekuatan Lentur *Glued Laminated* (Glulam) Kayu Vertikal dan Horizontal dengan Metode "Transformed Cross Section"

## *The Bending Strength of Vertical and Horizontal Glued Laminated Timber by "Transformed Cross Section" Method*

I. Sulistyawati, N. Nugroho, S. Surjokusumo, dan Y.S. Hadi

### Abstract

The bending strength of glued laminated (glulam) timber whose laminas were arranged horizontally will differ from vertically arranged. The important difference was known and used as consideration in lamina arrangement of glulam beam. The determination of precise lamina arrangement will result in maximal strength of design. The aim of this research was to analyze the strength or bending stress in each layer of lamina including maximum stress or modulus of rupture (MOR) of horizontal or vertical glulam beam. The analysis was conducted by using "Transformed Cross Section Area" method. Each glulam represented lamina formation from two wood species with higher modulus of elasticity (MOE) from Kempas (*Koompassia malaccensis* Maing) and lower one from Borneo (Mixed Species). Lamina with higher level of MOE was arranged in upper and lower edge for horizontal glulam, right and left edge for vertical glulam beam. Lamina with lower MOE was arranged in the middle of the beam. The comparison of higher to lower MOE of lamina was around 1.50 up to 1.70. Epoxy EWA-120 as synthetic adhesive was used with 150 g/m<sup>2</sup> glue spread. The result of laboratory examination of both glulam types showed that the average maximum load of vertical glulam was 13.53% higher than horizontal glulam beam, and also MOR of vertical glulam was around 27% higher than horizontal glulam beam. Based on The transformed cross section area method, nominal strength of horizontal glulam has linear function at the entire height. The actual strength that happened at lamina of horizontal glulam beam with lower MOE was smaller than nominal strength. The actual strength that happened at symmetrically vertical glulam beam at its height direction was maximal at the uppers and the lowest side, while it was zero at neutral line.

**Key words:** modulus of elasticity, modulus of rupture, transformed cross section area, glued laminated (glulam).

### Pendahuluan

Didalam perkembangan perencanaan struktur, perencana mempunyai inovasi dan daya kreatif tinggi. Perencana struktur cenderung mencari kemungkinan perencanaan yang sesuai dengan kegunaan, dan memenuhi syarat kekuatan serta ekonomis. Jenis material, bentuk dan metoda struktur merupakan hal yang perlu mendapat pertimbangan didalam suatu perencanaan. Glulam merupakan salah satu pilihan yang tepat. Glulam singkatan dari *Glued Laminated* adalah susunan beberapa lapis kayu direkatkan satu sama lain secara sempurna menjadi satu kesatuan tanpa terjadi diskontinuitas perpindahan tempat (Gurdal *et al.* 1999). Arah serat seluruh lapisan paralel terhadap panjang balok. Dua prinsip desain laminasi adalah memaksimalkan dimensi dengan meminimalkan material, apabila kedua prinsip tersebut dapat dilakukan secara simultan maka tujuan penggunaan laminasi dapat dicapai secara maksimal, sehingga laminasi merupakan desain ekonomis dengan tetap memenuhi prinsip struktural (Bodig dan Jayne 1993). Juga beberapa pernyataannya adalah kayu sebagai material alamiah berupa balok atau log mungkin belum merupakan produk yang efisien sebagai komponen struktural; sebuah balok kayu utuh

dengan adanya cacat kayu, kapasitas memikul beban menjadi lebih kecil; dengan memotong menjadi beberapa lapis lebih tipis yang biasa disebut lamina dan kemudian melekatkan kembali dengan menghilangkan cacat kayu atau mengatur posisi cacat kayu secara tepat maka sifat mekanisnya akan meningkat.

Lapisan kayu dapat diatur dengan mutu disesuaikan dengan fungsi ditinjau dari segi kemampuan struktural didalam menerima beban. Dengan susunan lapisan yang mempunyai mutu berbeda pada lapis tertentu akan meningkatkan sifat mekanis kayu antara lain kekuatan dan kekakuannya. Dengan menyusun lapisan kayu dan memberikan lapisan yang mempunyai mutu lebih tinggi pada daerah dengan tegangan besar dan mutu yang lebih rendah pada daerah lainnya, penampang laminasi akan bekerja efektif didalam menerima beban lentur sehingga akan mempengaruhi kekuatan lentur maupun kekakuan dari satu kesatuan laminasi tersebut. Ritter dan Williamson (1995), menyatakan bahwa glulam dapat dibuat secara horizontal yang disebut glulam horizontal dengan penempatan laminasi dengan kualitas tinggi pada posisi teratas dan terbawah balok; didalam perkembangan desain juga dikembangkan glulam vertikal untuk sistim dek jembatan.

Ditinjau dari segi ekonomis kelebihan laminasi adalah: mempunyai kemampuan meningkatkan dimensi, yaitu dari persediaan material yang lebih kecil atau tipis dapat disusun menjadi satu kesatuan laminasi dengan dimensi yang lebih besar; mempunyai kemampuan membuat bentuk struktural seperti lengkung, yang mana hal ini sulit apabila menggunakan material lainnya; mempunyai nilai keindahan ditinjau dari segi arsitektural. Hal-hal tersebut di atas menjadikan laminasi mempunyai nilai tambah atau nilai jual yang lebih tinggi.

Salah satu kajian dalam menganalisis kekuatan glulam adalah untuk mengetahui tegangan lentur atau sering juga dikatakan sebagai tegangan normal, yang terjadi akibat adanya pengaruh lentur. *Modulus of Rupture (MOR)* merupakan kekuatan atau tegangan lentur maksimum terjadi pada serat tepi atas dan bawah, masing-masing mengalami lentur tekan atau tarik. Lamina dimodelkan sebagai material ekuivalen homogen dengan *MOE* konstan pada seluruh penampang. Didalam analisis kekuatan glulam tidak dapat dilakukan seperti pada balok dengan kayu utuh, oleh karena glulam tersusun dari beberapa lapis material dengan *MOE* berbeda. Analisis kekuatan untuk glulam dilakukan menggunakan metoda "*Transformed Cross Section*", yaitu metoda penggunaan konversi nilai *MOE* yang bervariasi pada masing-masing lamina terhadap satu nilai *MOE*, dan metoda ini mempunyai pengaruh mengurangi lebar lamina dengan *MOE* rendah, dan menambah lebar lamina dengan *MOE* tinggi (Bodig dan Jayne 1993). "*Transformed Cross Section*" merupakan potongan melintang transformasi komponen material homogen dengan satu nilai *MOE* yang merupakan hasil perubahan dari bentuk komponen komposit (Beer dan Johnston 1992). Prediksi kekuatan glulam dilakukan dengan metoda "*Transformed Cross Section*" dibandingkan terhadap pengujian laboratorium menghasilkan nilai yang hampir sama (Lee dan Kim 2000).

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis kekuatan atau tegangan lentur pada setiap lapisan lamina termasuk tegangan lentur maksimum atau *modulus of rupture (MOR)* balok glulam yang disusun secara horisontal dan vertikal, dan membandingkan hasil keduanya.

### Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Keteknikan Kayu Institut Pertanian Bogor Darmaga Bogor, dari persiapan bahan, pembuatan contoh uji sampai dengan pengujian laboratorium. Kayu yang dipergunakan adalah jenis kayu Kempas (*Koompassia Malaccensis* Maing) dan Borneo (*Mixed Species*) yang dibeli di pasaran dengan ukuran 6 cm x 12 cm x 400 cm pada dimensi tebal, lebar dan panjang. Bahan perekat yang digunakan didalam pembuatan glulam adalah perekat sintesis *Epoxy Bond*

EWA 120. Dari balok tersebut terlebih dahulu diadakan pemilahan kekuatan (*stress grading*) dengan uji lentur menggunakan alat *Panter*, kemudian ditentukan kelas kuat kayu berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 2002) tentang "Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu". Dari kayu yang telah dikelompokkan berdasarkan kelas kuat kayu dibuat lamina ukuran 1.25 cm x 5 cm x 76 cm dengan seluruh permukaan diserut halus. Masing-masing lamina diadakan pemilahan dan dikelompokkan berdasarkan kelas kuatnya. Dari hasil pemilahan lamina menunjukkan bahwa kelas kuat kayu Kempas antara *E16-E21* dan Borneo antara *E10-E14*. Glulam terdiri dari 4 (empat) lapis lamina dengan kelas kuat tinggi yaitu dari kayu Kempas disusun masing-masing pada sisi atas dan bawah untuk glulam horizontal dan sisi kiri dan kanan untuk glulam vertikal, sedangkan pada bagian tengah merupakan lamina dari kayu Borneo dengan *MOE* lebih rendah. Susunan lamina berdasarkan kelas kuat untuk glulam horizontal dan vertikal dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Pemberian perekat dengan berat labur 150 g/m<sup>2</sup> dilakukan pada kedua permukaan antar lapis lamina kemudian diklem selama 24 jam. Dimensi glulam adalah 5 cm x 5 cm x 76 cm. Pengujian lentur glulam dilakukan berdasarkan ketentuan yang diatur dalam *American Society for Testing and Material (ASTM) D 143*, "*Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*", *Section 8: Static Bending (ASTM 2005)*. Balok glulam diletakkan dengan bentang bersih 71 cm di atas perletakan sendi dan rol. Balok dibebani dengan 2 (dua) buah beban terpusat masing-masing terletak pada jarak 1/3 bentang bersih (*third point loading*). Pembebanan diberikan hingga terjadi keruntuhan pada balok dan diadakan pembacaan pertambahan besar beban dan defleksi yang terjadi ditengah bentang. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Universal Testing Machine merk *Baldwin*. Kadar air diukur beberapa saat sebelum pengujian dengan bantuan alat *digital moisture content* dan diperoleh nilai sekitar 14 ~ 16 %.

Susunan 4 (empat) lapis lamina dengan *MOE* lebih tinggi pada sisi atas dan bawah untuk glulam horizontal dan sisi kiri dan kanan untuk glulam vertikal. Susunan lamina dengan masing-masing nilai *MOE* dapat dilihat pada Tabel 1, perbandingan *MOE* tinggi terhadap rendah sekitar 1.50 sampai dengan 1.70. Kelas Kuat (*E*) menyatakan nilai *MOE* kayu ( $E_n - 1$ ) x 10.000 kg/cm<sup>2</sup> (SNI 2002). Sebagai contoh *E21* mempunyai nilai *MOE* = 200.000 kg/cm<sup>2</sup>. Secara skematis gambar penampang glulam serta letak pembebanan pada pengujian lentur dilaboratorium dapat dilihat seperti pada Gambar 1.

Tegangan lentur yang terjadi pada setiap ketinggian penampang terlebih dahulu dihitung sebagai tegangan lentur nominal berdasarkan penampang dengan masing-masing *MOE* lapisan lamina yang telah ditransformasi pada satu lamina tertentu. Pada kasus ini ditentukan *MOE* yang tetap adalah lamina pada lapisan atas untuk glulam

horizontal dan tepi pada glulam vertikal, *MOE* terbesar ditentukan sebagai pengukur, sedangkan lainnya sebagai nilai transformasi.

Table 1. The arrangement of lamina based on the strength grade of wood.

HORIZONTAL GLULAM		VERTICAL GLULAM	
Specimen	Strength Grade	Specimen	Strength Grade
H1	21	V1	21
	14		14
	14		14
H2	21	V2	21
	20		20
	13		13
	13		13
H3	20	V3	20
	19		19
	13		13
	13		13
H4	19	V4	19
	18		18
	11		11
	11		11
H5	18	V5	18
	16		16
	10		10
	10		10
	16		16

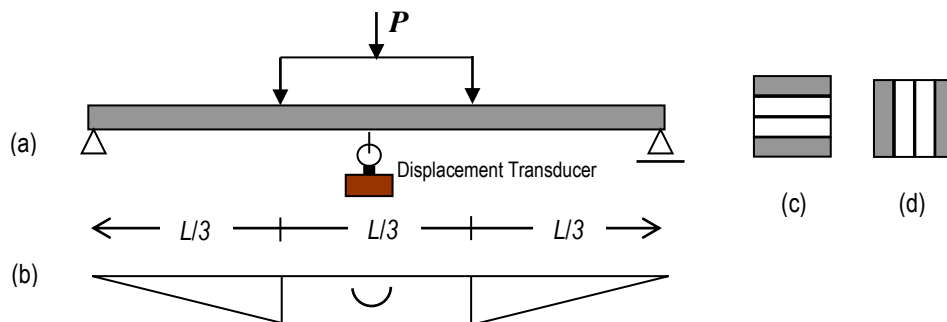


Figure 1. Schematic of bending test examination.

Notes:

- (a) Two point loading test ( $P$  = load ;  $L$  = span)
- (b) Bending moment diagram
- (c) Horizontal glulam cross section
- (d) Vertical glulam cross section

Faktor transformasi dari lapisan lamina adalah:

$$n = \frac{E_i}{E_n} \quad (1)$$

dimana:

- $n$  = faktor transformasi
- $E_n$  = MOE pengukur
- $E_i$  = MOE tertransformasi pada lapisan ke  $i$

Secara umum tegangan lentur nominal dapat dinyatakan,

$$\sigma_n = \frac{M}{I_{tr}} y \quad (2)$$

dimana:

- $\sigma_n$  = tegangan lentur nominal (kg/cm<sup>2</sup>)
- $M$  = momen =  $1/6 PL$  (kgcm)
- $I_{tr}$  = momen inersia transformasi (cm<sup>4</sup>)
- $Y$  = jarak titik tinjauan terhadap garis netral penampang (cm)

Dari tegangan lentur nominal dapat ditentukan tegangan aktual yang terjadi pada setiap titik dengan memperhitungkan kembali pengaruh MOE asalnya, sehingga dapat dituliskan bahwa,

$$\sigma_a = \frac{M}{I_{tr}} y \frac{b_{tr}^i}{b_i} \quad (3)$$

dimana:

- $\sigma_a$  = tegangan lentur aktual (kg/cm<sup>2</sup>)
- $b_i$  = lebar balok pada lapis ke  $i$
- $b_{tr}^i$  = lebar balok transformasi pada lapis ke  $i$

dan (4)

$$I_{tr} = 2 \sum_i^n \left[ I_{0_{tr}}^i + A_{tr}^i (d^i)^2 \right]$$

untuk glulam horizontal

$$I_{tr} = \sum_i^n \frac{1}{12} b_{tr}^i h^3$$

untuk glulam vertikal

dimana:

- $I_{0_{tr}}^i$  = momen inersia elemen  $i$  tertransformasi (cm<sup>4</sup>)
- $A_{tr}^i$  = luas lamina lapisan  $i$  tertransformasi (cm<sup>2</sup>)
- $d^i$  = jarak titik berat elemen  $i$  terhadap garis netral penampang (cm)
- $h$  = tinggi penampang (cm)

### Hasil dan Pembahasan

Oleh karena balok glulam yang diteliti adalah simetris pada arah ketinggiannya, maka kekuatan lentur maksimum tarik dan tekan adalah sama, tarik terjadi pada serat sisi bawah dan tekan pada sisi atas penampang glulam. Kekuatan lentur maksimum terjadi pada daerah yang mengalami momen lentur terbesar yaitu di tengah bentang di antara dua beban terpusat. Dari hasil pengamatan, akibat terjadinya leturan pada balok glulam terjadi slip di antara lapisan pada daerah tarik. Hal ini seharusnya tidak diharapkan apabila penampang glulam adalah monolit. Tidak menyatunya antar lapisan glulam disebabkan kurang sempurnanya proses perekatan, menyebabkan penurunan sifat mekanis glulam, sehingga kekuatan akan menurun, hal ini dinyatakan pula oleh Sulistyawati dan Surjokusumo (2003) dan Sulistyawati *et al.* (2008). Kerusakan (*failure*) dari glulam vertikal seperti layaknya pada kayu utuh, yaitu diawali kerusakan pada serat terpepi daerah tarik. Gaya maksimum yang dapat dipikul pada balok glulam horizontal adalah antara 1284 ~ 1729 kg dan rata-rata 1482 kg, sedangkan 1341 ~ 1934 kg untuk balok glulam vertikal dengan rata-rata 1683 kg.

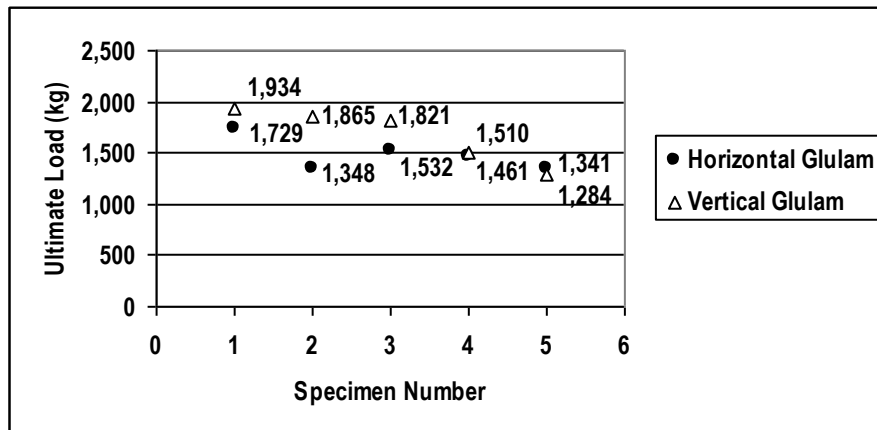


Figure 2. Ultimate load of horizontal and vertical glulam beam.

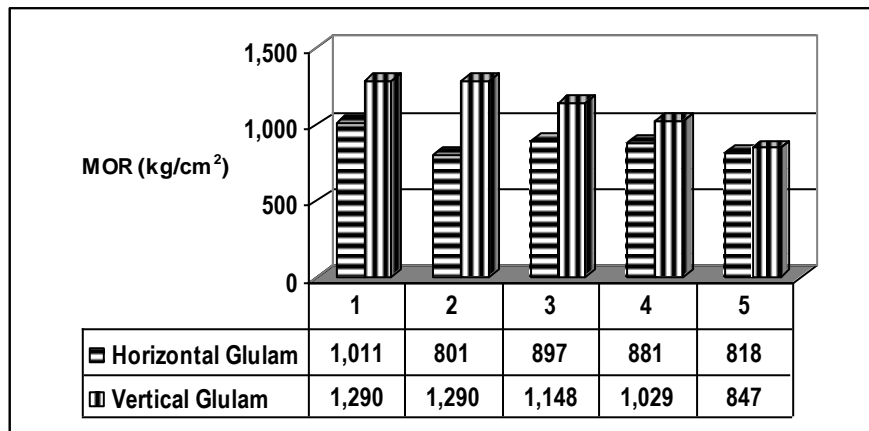


Figure 3. The Modulus of Rupture of glulam beam.

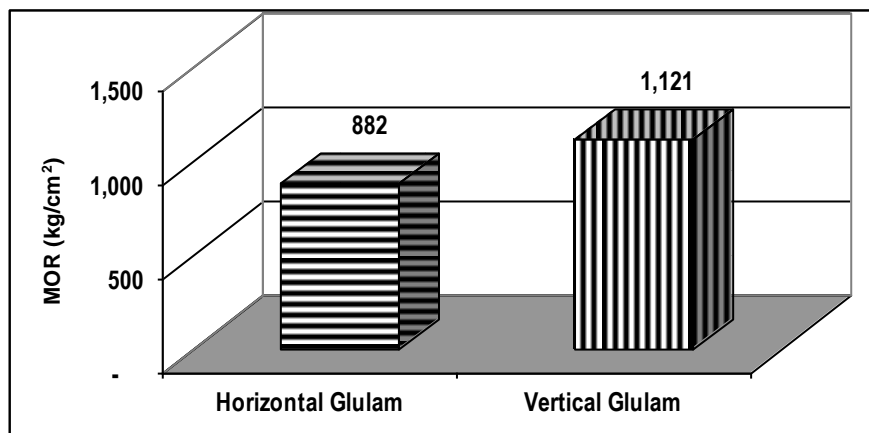


Figure 4. The average of Modulus of Rupture of glulam beam.

Dari hasil analisis untuk kedua jenis balok Glulam, diperoleh hasil bahwa seluruh MOR balok Glulam vertikal adalah lebih tinggi daripada glulam horizontal (Gambar 3). Nilai MOR contoh uji 1 (satu) sampai dengan 5 (lima) yaitu dengan kombinasi MOE yang lebih tinggi sampai dengan lebih rendah untuk balok glulam horizontal dan vertikal menurun dan dapat dinyatakan dengan persamaan masing-masing  $y = 13.028 x^2 - 108.86 x + 1065$  dengan  $R^2 = 0.4378$  dan  $y = -24.457 x^2 + 32.113 x + 1293.6$  dengan  $R^2 = 0.9893$ . Rata-rata MOR balok glulam horizontal adalah 882 kg/cm<sup>2</sup> dan 1,121 kg/cm<sup>2</sup> untuk balok glulam vertikal sehingga MOR balok glulam vertikal adalah 27% lebih besar dibandingkan dengan balok glulam horizontal (Gambar 4).

Sketsa tegangan lentur nominal maupun aktual yang terjadi pada setiap lapis tinjauan dari penampang balok glulam dapat dilihat seperti pada Gambar 5. Sebagai gambaran didalam perhitungan tegangan lentur aktual balok glulam horizontal menggunakan metoda "Transformed Cross Section" diambil data pengujian lentur balok glulam nomor 1 (satu). Susunan MOE 4 lapis

lamina dari lapisan teratas sampai terbawah adalah masing-masing 200,000 kg/cm<sup>2</sup> (E21), 130,000 kg/cm<sup>2</sup> (E14), 130,000 kg/cm<sup>2</sup> (E14), dan 200,000 kg/cm<sup>2</sup> (E21). Tegangan lentur nominal yang diperoleh pada serat tepi tertekan (teratas) dan tertarik (terbawah) adalah 1,011 kg/cm<sup>2</sup>. Faktor transformasi n masing-masing lapisan lamina dapat dihitung menggunakan rumus 1, dari nilai tersebut dapat diperoleh lebar lamina tertransformasi. Tegangan lentur aktual dihitung pada masing-masing ketinggian lamina berdasarkan rumus 3. Sebagai contoh tegangan lentur aktual pada tepi atas lamina dengan ketinggian 1.25 cm dibawah garis netral adalah  $506 \text{ kg/cm}^2 \times ((13,000/20,000)(5)/5) = 329 \text{ kg/cm}^2$ . Terlihat bahwa pada lapisan dengan MOE lebih kecil, tegangan lentur aktual juga lebih kecil dibandingkan tegangan nominalnya. Pengurangan nilai tegangan lentur aktual sebanding dengan faktor transformasi pada lapisan lamina. Secara rinci seluruh nilai tersebut dapat dilihat seperti pada Tabel 2.

Table 2 The Bending strength of horizontal glulam on each height.

The Section Height (cm)	Bending Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	
	Nominal	Actual
2.5	-1,011	-1,011
1.25	-506	-506
1.25	-506	-329
0	0	0
-1.25	506	329
-1.25	506	506
2.5	1,011	1,011

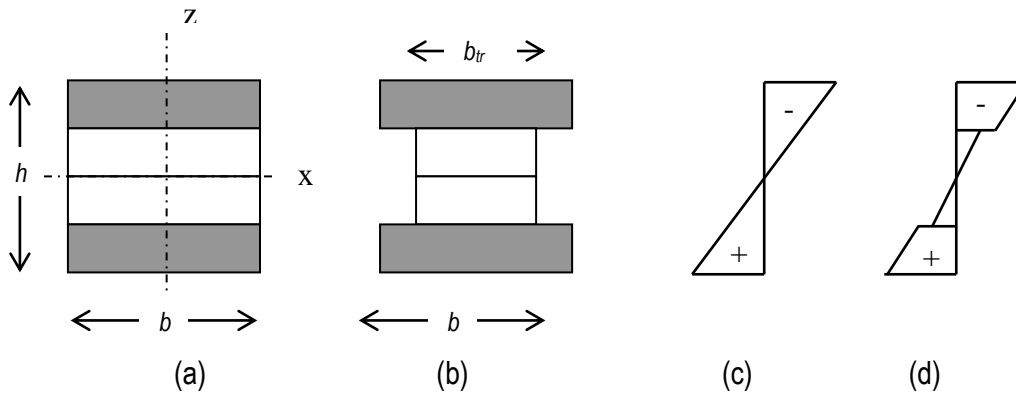


Figure 5. The Bending strength diagram of horizontal glulam.

Notes:

- (a) Horizontal glulam cross section ( $h$  = height;  $b$  = width;  $b_{tr}$  = transformation width;  $x$  = horizontal axis;  $y$  = vertical axis)
- (b) Transformed cross section
- (c) Diagram of nominal bending strength
- (d) Diagram of actual bending strength

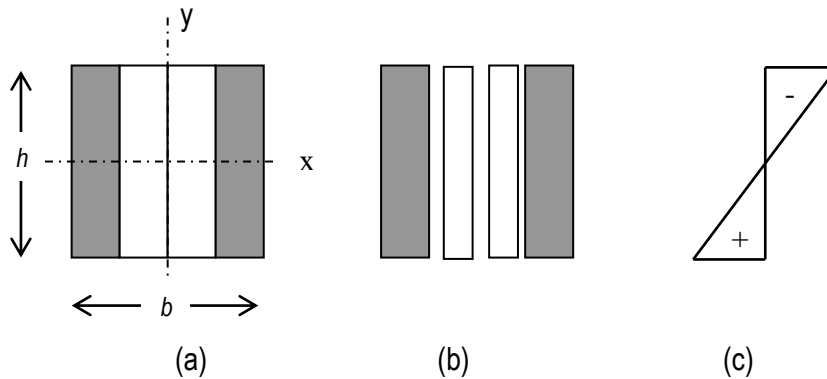


Figure 6. The bending strength diagram of vertical glulam.

Notes:

- (a) Vertical glulam cross section
- (b) Transformed cross section
- (c) Diagram of nominal bending strength (=actual bending strength)

Tegangan lentur nominal maupun aktual yang terjadi pada glulam vertikal yang simetris pada arah ketinggiannya adalah linier, maksimum pada serat sisi atas dan bawah serta nol pada garis netralnya, dapat dilihat pada Gambar 6. Hal ini terjadi oleh karena masing-masing lamina mempunyai lebar transformasi yang tetap pada seluruh ketinggiannya, tidak terjadi perubahan lebar lamina oleh karena *MOE* sama pada seluruh ketinggian laminanya. Tegangan maksimum pada serat sisi atas dan bawah merupakan nilai *MOR* dengan masing-masing nilai untuk kelima jenis benda uji glulam vertikal dapat dilihat seperti pada Gambar 3.

### Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa gaya maksimum balok glulam vertikal 13.5% lebih tinggi jika dibandingkan dengan balok glulam horizontal; *MOR* glulam vertikal lebih tinggi 27% dari pada glulam horizontal, artinya glulam vertikal lebih kuat dari glulam horizontal; terjadi perbedaan nilai antara tegangan lentur nominal dan aktual pada lapisan lamina tertentu pada balok glulam horizontal; besar tegangan lentur nominal dan aktual pada masing-masing ketinggian lamina balok glulam vertikal adalah sama; kerusakan (*failure*) balok glulam horizontal sering diawali dengan terjadinya slip pada sambungan antara lapisan diikuti kerusakan pada serat terbawah daerah tarik, sedangkan kerusakan balok glulam vertikal terjadi hanya pada serat terbawah daerah tarik.

Disarankan mengadakan penelitian lanjutan untuk mendapatkan kekuatan lentur balok glulam horizontal dan vertikal dengan dimensi penampang melintang, jumlah lamina, dan variasi *MOE* berbeda yang dihitung dengan metoda "*Transformed Cross Section*" dibandingkan dengan cara konvensional.

### Daftar Putaka

- American Society for Testing and Material (ASTM). 2005. Annual Book of ASTM Standards. Volume 04.10. Wood. D 143-05 Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. Section 8: Static Bending. USA.
- Beer, F.P. and E.R. Johnston. 1992. Mechanics of Materials. McGraw-Hill. London.
- Bodig J. and B.A. Jayne. 1993. Mechanics of Wood and Wood Composites. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA.
- Gurdal, Z.; R.T. Haftka; P. Hajela. 1998. Design and Optimization of Laminated Composite Material. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lee, J.J. and G.C. Kim. 2000. Study on the Estimation of the Strength Properties of Structural Glued

Laminated Timber I: Determination of Optimum *MOE* as Input Variable. Journal of Wood Science 46(2): 115-121

- Ritter, M.A. and T.G. Williamson. 1995. Glulam Timber Bridge Design in the United States. Proceedings of 27<sup>th</sup> Meeting of International Council for Building Research Studies and Documentation. Germany: Universitat Karlsruhe, CIB-W18/27-1.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). 2002. Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu Indonesia. Badan Standarisasi Nasional (BSN). Indonesia.
- Sulistiyawati, I. and S. Surjokusumo. 2003. The Behavior of Horizontal and Vertical Glued Laminated Timber Under Bending Load. Proceedings of the Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 16-18 December 2003, Bali. Hal: MTS-1.
- Sulistiyawati, I.; N. Nugroho; S. Surjokusumo; Y.S. Hadi. 2008. The Performance of Lamina's Thickness for Horizontally Glued Laminated Beam. Proceedings of 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering. June 2008, Miyazaki, Japan. page 152.

Makalah masuk (*received*) : 29 Januari 2008  
 Diterima (*accepted*) : 30 Mei 2008  
 Revisi terakhir (*final revision*) : 02 Juli 2008

Indah Sulistiyawati  
 Mahasiswa Program Pasca Sarjana, Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor (*Graduate Student at Forest Products Department, Faculty of Forestry, Bogor Agricultural University*)

dan  
 Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Trisakti (*Lecturer of Civil Department, Faculty of Civil Engineering and Planning, Trisakti University*)  
 Tel : 08161316634; 08131119601  
 E-mail : indahusakti@yahoo.com

Naresworo Nugroho, Surjono Surjokusumo dan Yusuf Sudo Hadi  
 Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor (*Forest Products Department, Faculty of Forestry, Bogor Agricultural University*)  
 Tel : 0251-621285  
 HP : 0811165232 (Surjono Surjokusumo)  
 E-mail : naresworo@yahoo.com  
 yshadi@indo.net.id