

# DISTORTION ENERGY CRITERION FOR TIMBER UNIAXIAL COMPRESSION MECHANICAL PROPERTIES

## KRITERIA ENERGI DISTORI UNTUK SIFAT MEKANIS TEKAN UNIAKSIAL KAYU

Yosafat Aji Pranata<sup>1)</sup> dan Bambang Suryoatmono<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH., No. 65, Bandung 40164, E-mail yosafat.ap@gmail.com

<sup>2)</sup>Guru Besar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,  
Jalan Ciumbuleuit 94 Bandung 40141, E-mail suryoat@yahoo.com

### ABSTRACT

A material with three mutually perpendicular planes of symmetry is called orthotropic, common example of such material include wood. In longitudinal or grain direction is distinct from the other two directions. In this paper, Hill's criterion or von Mises criterion extended to include orthotropic nature of the material, is used to derive an alternative equation for predicting compression strength at an angle to the grain in plane stress scope. In the alternative equation, compression strengths parallel and perpendicular to grain, also shear strength parallel to grain influence the compression strength at an angle to the grain. The compression strengths predicted using the alternative equation are very close to those of various cross grain specimens made of three Indonesian species in hardwood category tested under uniaxial compression stress. For cross grain near 0 degree and 90 degrees, the compression strength using the alternative equation is very close to the Hankinson's and PKKI N15 formulas but for cross grain near 45 degrees, the difference between the alternative equation and Hankinson's and PKKI N15 formulas are quite large. For uniaxial compression at an angle to the grain, a failure equation which is based on von Mises distortion energy criterion is proposed as an alternative to the Hankinson's formula.

**Keywords :** Distortion energy criterion, uniaxial compression, plane stress, angle, orthotropic

### ABSTRAK

Material dengan tiga arah utama sumbu simetri yang saling tegak lurus disebut ortotropik, sebagai contoh adalah material kayu. Pada arah longitudinal atau arah serat sangat berbeda dengan dua arah lainnya. Dalam tulisan ini, kriteria Hill atau kriteria von Mises diperluas untuk material alami seperti ortotropik, yang mana digunakan untuk menurunkan persamaan alternatif untuk memprediksi kuat tekan bersudut terhadap arah serat dalam lingkup tegangan bidang. Dalam persamaan alternatif, kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat, serta kuat geser sejajar serat kayu mempengaruhi besarnya kuat tekan bersudut. Kuat tekan yang diprediksi dengan menggunakan persamaan alternatif sangat dekat dengan hasil uji eksperimental tekan uniaksial beberapa variasi spesimen untuk tiga jenis kayu Indonesia kategori *hardwood*. Untuk arah serat mendekati 0 derajat dan 90 derajat, kuat tekan hasil persamaan alternatif dekat dengan persamaan Hankinson dan PKKI N15 tetapi untuk arah serat mendekati 45 derajat, perbedaan hasil persamaan alternatif dan Hankinson dan PKKI N15 sangat besar. Persamaan kegagalan yang berbasis pada kriteria energi distorsi von Mises dapat diusulkan menjadi persamaan alternatif selain persamaan Hankinson.

**Kata-kata kunci:** Kriteria energi distorsi, tekan uniaksial, tegangan bidang, sudut, ortotropik

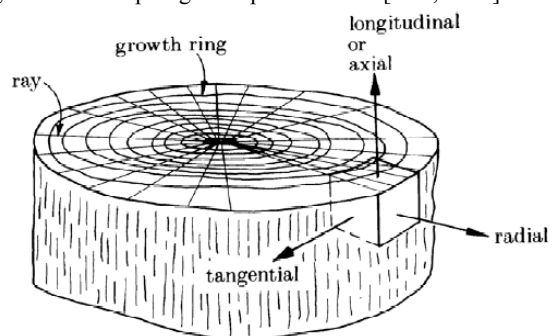
### PENDAHULUAN

Kayu merupakan material yang diperoleh dari tumbuhan alami. Dalam sudut pandang perilaku struktur, kayu mempunyai keunggulan dan kelemahan. Kayu mempunyai tiga arah sumbu utama (material ortotropik), yang mana pada arah sumbu terkuat kekakuan dan kekuatannya sangat besar, lebih besar daripada material lain apabila ditinjau berdasarkan rasio kekuatan terhadap berat jenis material. Sedangkan kelemahannya adalah pada dua arah sumbu lainnya, kayu relatif lemah dan lunak, hal ini dapat mengakibatkan adanya retak dan menyebabkan terjadinya kegagalan (*failure*) struktur. Karena kayu mempunyai properti mekanis berbeda pada ketiga arah sumbu utama tersebut, maka diperlukan banyak parameter-parameter pendekatan untuk suatu analisis nonlinier sistem struktur kayu.

Permasalahan yang berhubungan dengan hal tersebut adalah properti mekanis kayu yang bervariasi. Pohon tumbuh di hutan yang mempunyai variasi alami berbeda-beda tergantung antara lain faktor-faktor luar yaitu jenis tanah dan kondisi iklim, serta faktor dari dalam pohon yaitu usia pohon (usia pertumbuhan). Properti mekanis kayu secara dominan dipengaruhi oleh hal-hal tersebut, sehingga untuk suatu tipe kayu tertentu pun, antara pohon satu dengan yang lain menghasilkan properti berbeda.

Tiga arah sumbu utama kayu yaitu arah longitudinal, arah radial, dan arah tangensial. Arah longitudinal didefinisikan sebagai arah sejajar serat, arah radial adalah tegak lurus serat serta a-

rah normal terhadap lingkaran pertumbuhan (*growth rings*). Sedangkan arah tangensial adalah tegak lurus serat tetapi arah sudut tangensial terhadap lingkaran pertumbuhan [FPL, 2010].



Gambar 1. Sumbu utama material (Ashby et.al., 1985).

### Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah melakukan penelitian eksperimental dan analitikal untuk mendapatkan persamaan (formula) empiris alternatif untuk memprediksi nilai kuat tekan kayu dengan tinjauan arah serat kayu membentuk sudut ( $F_{ca}$ ).

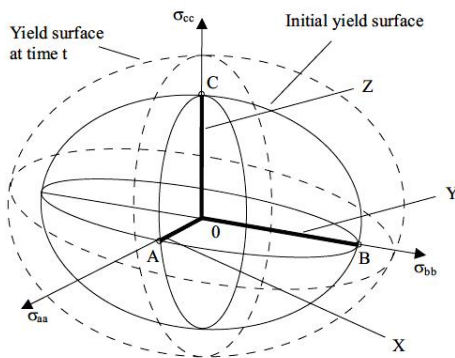
Studi analitikal yang dimaksud adalah berdasarkan dasar teori persamaan konstitutif material plastik ortotropik Hill (Chen

dan Han, 2007), yaitu dengan cara menurunkan persamaan energi distorsi von Mises untuk material ortotropik dengan tinjauan tegangan bidang. Sebagai validasi dan verifikasi, maka dilakukan penelitian eksperimental dengan benda uji tekan berbagai sudut, dengan model benda uji mengacu pada ASTM D143 (ASTM, 2008).

Ruang lingkup penelitian dibatasi yaitu kayu yang digunakan adalah spesies kayu Indonesia kategori *Hardwood*, dengan rentang berat jenis berkisar antara 0,5-0,9 yaitu meranti merah (*shorea spp.*), keruing (*dipterocarpus spp.*), dan akasia mangium.

## MATERIAL ORTOTROPIK

Meskipun kayu secara mikrostruktur adalah sangat kompleks, tapi diasumsikan homogen (Kharouf et.al., 2003; Persson, 2000). Cacat alami seperti mata kayu (*knot*), *taper*, dan distorsi arah sejajar serat diabaikan.



Gambar 2. Kriteria leleh Hill (ADINA, 2009).

Dalam rentang suatu batasan proposional tertentu, perilaku material dimodelkan sebagai perilaku linier elastik ortotropik. Perilaku konstitutif material linier elastik ortotropik dapat dideskripsikan berdasarkan hukum Hooke (Persson, 2000). Sedangkan model material plastik ortotropik berdasarkan kriteria leleh Hill (Chen dan Han, 2007) adalah merupakan perluasan dari kriteria leleh von Mises,

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{bb} - \sigma_{cc})^2 + G(\sigma_{cc} - \sigma_{aa})^2 + H(\sigma_{aa} - \sigma_{bb})^2 + 2L\sigma_{ab}^2 + 2M\sigma_{ac}^2 + 2N\sigma_{bc}^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

dengan,

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \right) \quad (2.a)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \right) \quad (2.b)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \quad (2.c)$$

$$L = \frac{1}{2Y_{ab}^2} \quad (2.d)$$

$$M = \frac{1}{2Y_{ac}^2} \quad (2.e)$$

$$N = \frac{1}{2Y_{bc}^2} \quad (2.f)$$

dimana  $a, b, c$  adalah arah utama material. Kemudian  $X, Y, Z$  adalah tegangan leleh material pada arah  $a, b, c$  dan  $Y_{ab}, Y_{ac}, Y_{bc}$  ada-

lah tegangan leleh untuk geser murni pada bidang  $(a,b), (a,c)$ , dan  $(b,c)$ .

## Kriteria Energi Distorsi von Mises

Untuk kondisi *plane stress* dimana  $\sigma_{cc} = \sigma_{ac} = \sigma_{bc} = 0$ , maka Persamaan 1 dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{bb})^2 + G(\sigma_{aa})^2 + H(\sigma_{aa} - \sigma_{bb})^2 + 2L\sigma_{ab}^2 - 1 = 0 \quad (3)$$

Pengujian tekan kayu merupakan pengujian dengan model beban uniaksial. Kuat tekan arah sejajar serat kayu didefinisikan sebagai  $X$  dan arah tegak lurus serat kayu sebagai  $Y = Z$ . Sedangkan kuat geser sejajar arah serat kayu didefinisikan sebagai  $Y_{ab}$ .

$$F = \left( \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{2X^2} \right) \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{2X^2} \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{2X^2} \quad (6)$$

$$L = \frac{1}{2Y_{ab}^2} \quad (7)$$

maka Persamaan 3 menjadi sebagai berikut,

$$f(\sigma_{ij}) = \left( \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{2X^2} \right) (\sigma_{bb})^2 + \frac{1}{2X^2} (\sigma_{aa})^2 + \frac{1}{2X^2} (\sigma_{aa} - \sigma_{bb})^2 + \frac{1}{Y_{ab}^2} \sigma_{ab}^2 - 1 = 0 \quad (8.a)$$

$$f(\sigma_{ij}) = \left( \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{2X^2} \right) (\sigma_{bb})^2 + \frac{1}{2X^2} (\sigma_{aa})^2 + \frac{1}{2X^2} (\sigma_{aa}^2 - 2\sigma_{aa}\sigma_{bb} + \sigma_{bb}^2) + \frac{1}{Y_{ab}^2} \sigma_{ab}^2 - 1 = 0 \quad (8.b)$$

Selanjutnya Persaman 8.b dapat ditulis menjadi sebagai berikut,

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{\sigma_{aa}^2}{X^2} + \frac{\sigma_{bb}^2}{Y^2} - \frac{\sigma_{aa}\sigma_{bb}}{X^2} + \frac{\sigma_{ab}^2}{Y_{ab}^2} - 1 = 0 \quad (9)$$

Model material plastik ortotropik berdasarkan kriteria leleh Hill menggunakan kondisi sebagai berikut, dimana  $a, b, c$  adalah arah utama material, dan  $F, G, H, L, M, N$  adalah konstanta material. Kriteria leleh Hill merupakan perluasan dari kriteria leleh von Mises.

Asumsi bahwa respons material adalah sama dalam hal tarik dan tekan, serta tegangan hidrostatis tidak mempengaruhi leleh. Parameter material dapat ditentukan dari tiga tes tekan pada arah sumbu utama (sejajar serat dan tegak lurus serat), serta tiga tes geser pada bidang simetri. Tiga kekuatan tekan tersebut untuk mendapatkan parameter  $X, Y, Z$ , dan tiga kekuatan geser untuk mendapatkan parameter  $Y_{ab}, Y_{ac}$ , dan  $Y_{bc}$  (Chen dan Han, 2007).

Dengan menggunakan notasi kuat tekan sejajar serat kayu, kuat tekan tegak lurus serat kayu, dan kuat geser sejajar serat kayu, maka Persamaan 9 menjadi sebagai berikut,

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{\sigma_1^2}{F_{c||}^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_{c\perp}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_{c||}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{F_{v||}^2} - 1 = 0 \quad (10)$$

Persamaan 10 sama dengan yang telah dipublikasikan pada penelitian Kharouf (Kharouf, 200100).

Selanjutnya besarnya tegangan  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , dan  $\tau_{12}$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 11.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma}{2} \cos(2\beta) \quad (11.a)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma}{2} - \frac{\sigma}{2} \cos(2\beta) \quad (11.b)$$

$$\tau_{12} = -\frac{\sigma}{2} \sin(2\beta) \quad (11.c)$$

**Persamaan Hankinson**

Dalam *Wood Handbook* (FPL, 2010), kuat tekan bersudut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Hankinson, yaitu ditampilkan pada Persamaan 13.

$$F_{\alpha} = \frac{F_{c//} \cdot F_{c\perp}}{F_{c//} \cdot \sin^2 \alpha + F_{c\perp} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (12)$$

dimana  $F_{\alpha}$  adalah kuat tekan pada sudut arah serat kayu sebesar  $\alpha$ ,  $F_{c//}$  adalah kuat tekan sejajar serat kayu, dan  $F_{c\perp}$  adalah kuat tekan tegak lurus serat kayu. Kegagalan (*failure*) terjadi apabila kondisi tegangan  $\sigma = F_{\alpha}$ , yaitu dinyatakan dalam Persamaan 13.

$$\frac{\sigma \sin^2 \alpha}{F_{c\perp}} + \frac{\sigma \cos^2 \alpha}{F_{c//}} = 1 \quad (13)$$

**Persamaan Berdasarkan PKKI N15**

Dalam Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia PKKI N15 (YLPMB, 1961), prediksi besarnya kuat tekan bersudut terhadap arah serat kayu sebesar  $\alpha$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 14.

$$F_{\alpha} = F_{c//} - (F_{c//} - F_{c\perp}) \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

Secara umum, baik persamaan Hankinson maupun persamaan berdasarkan PKKI N15, prediksi kuat tekan bersudut tidak dipengaruhi oleh parameter kuat geser kayu. Sedangkan dalam persamaan alternatif kriteria leleh Hill, kuat tekan bersudut dipengaruhi oleh parameter kuat geser kayu.

**STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN**

Pengujian eksperimental di laboratorium dilakukan dengan menggunakan Instrumen *Universal Testing Machine (UTM)*. Beban yang diaplikasikan berupa kontrol peralihan (*load displacement*) dengan kecepatan *crosshead* yang berbeda-beda sesuai tipe pengujian. Pengaruh dinamik dapat diabaikan karena kecepatan pembebanan termasuk dalam kategori lambat. Pengujian dihentikan apabila spesimen (benda uji) mengalami kegagalan (*failure*).

Sebelum proses fabrikasi benda uji, bahan baku kayu yang akan digunakan diperiksa terlebih dahulu kadar air kayu dengan menggunakan dua cara, yaitu menggunakan alat *oven* dan alat pembaca kadar air otomatis yaitu *Lignomat Digital Moisture Tester*.

Skematik alur penelitian eksperimental dan penelitian analitik ditampilkan pada Gambar 3. Kayu yang digunakan adalah spesies kayu Indonesia kategori *Hardwood*, dengan rentang berat jenis berkisar antara 0,5-0,9 yaitu meranti merah (*shorea spp.*), kruing (*dipterocarpus spp.*), dan akasia mangium. Hasil pengujian sifat fisik kayu, yaitu berat jenis dan kadar air selengkapnya ditampilkan pada Tabel 1.

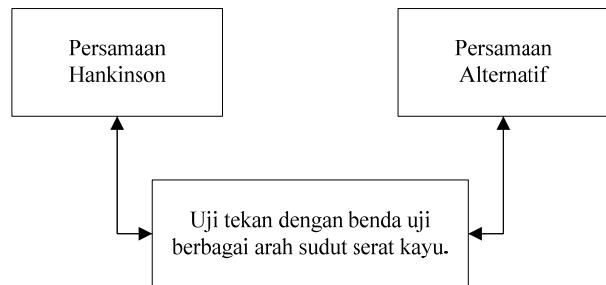
Sesuai kriteria pengujian tekan sejajar serat kayu ( $\alpha = 0^\circ$ ) berdasarkan ASTM D143 [ASTM, 2008], ukuran benda uji yang digunakan adalah 50 mm x 50 mm x 200 mm (selanjutnya dalam penulisan ini disebut model A). Sedangkan ukuran benda uji te-

gak lurus serat kayu ( $\alpha = 90^\circ$ ) adalah 50 mm x 50 mm x 150 mm (selanjutnya dalam penulisan ini disebut model B).

Tabel 1. Hasil pengujian sifat fisika kayu: berat jenis dan kadar air [Pranata et.al., 2011].

Jenis Kayu	Jumlah spesimen	SG (rata-rata)	C.O.V.	MC (%)
Meranti Merah	21	0,51	13,12	15,14
Keruing	50	0,82	12,49	14,18
Akasia Mangium	16	0,45	11,59	21,94

Hasil pengujian parameter utama yaitu kuat tekan sejajar serat kayu, kuat tekan tegak lurus serat kayu, dan kuat geser kayu selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 [Pranata et.al., 2011]. Tiga parameter tersebut selanjutnya yang akan digunakan didalam komputasi perhitungan kuat tekan berbagai arah sudut serat berdasarkan persamaan Hankinson, Persamaan alternatif, dan Persamaan PKKI N15. Ketiga hasil perhitungan dengan ketiga persamaan tersebut selanjutnya dibandingkan terhadap hasil penelitian eksperimental.



Gambar 3. Skematik alur penelitian dan pengujian

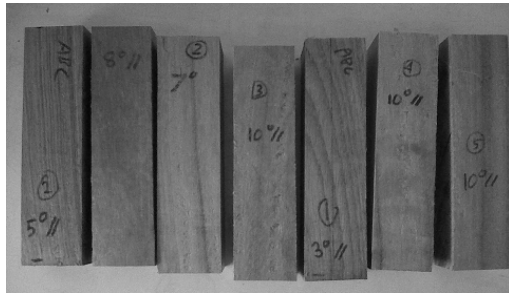
Hasil perhitungan kuat tekan berbagai arah sudut serat dengan ketiga metode dan hasil pengujian eksperimental selengkapnya ditampilkan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7 (kayu Kruing); Tabel 8, Tabel 9, Tabel 10 (kayu Akasia Mangium); dan Tabel 11, Tabel 12, Tabel 13 (kayu Meranti Merah).

Dalam penelitian eksperimental, untuk benda uji dengan arah serat bersudut kurang dari  $30^\circ$  digunakan benda uji model A, sedangkan untuk benda uji dengan arah serat bersudut lebih besar dari  $30^\circ$  digunakan benda uji model B.

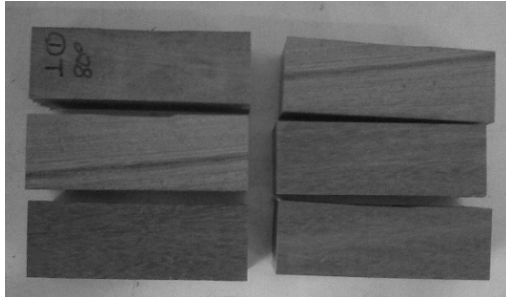
Pengujian tekan kayu benda uji model A dan benda uji tekan sejajar serat kayu dilakukan berdasarkan pedoman ASTM D143 (ASTM, 2008). Kecepatan *crosshead* dengan *strain rate* 0,003 mm/mm per menit atau *displacement rate* 0,6 mm per menit. Penampang dibuat seragam dan ujung-ujung permukaan rata dan horisontal.

Gambar 6 memperlihatkan contoh pengujian dengan benda uji mempunyai sudut serat  $0^\circ$ . Dalam pelaksanaan pengujiannya, dipasang 4 (empat) buah *LVDT* yang berfungsi untuk mengukur peralihan arah transversal pada masing-masing sisi benda uji, berkaitan dengan perhitungan nilai rasio poisson. Dalam penulisan ini tidak dibahas mengenai nilai rasio poisson. Gambar 4 memperlihatkan benda uji tekan berbagai sudut (untuk nilai  $\alpha \leq 30^\circ$ ) untuk kayu Keruing.

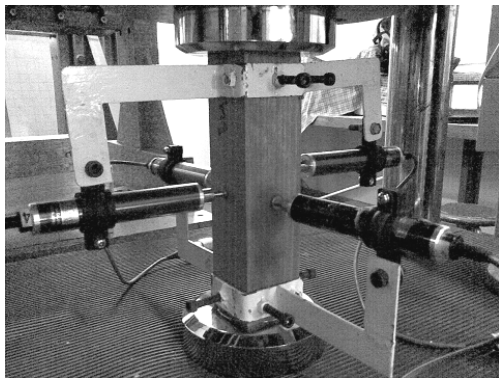
Sedangkan Gambar 5 memperlihatkan benda uji tekan berbagai sudut kayu Keruing untuk nilai  $\alpha > 30^\circ$ . Untuk pengujian tekan kayu benda uji model B dan benda uji tekan tegak lurus serat kayu, model beban yang bekerja dilakukan dengan media berupa *metal bearing plate* ukuran 50mm x 50mm. Kecepatan *crosshead* adalah 0,305 mm per menit. Gambar 7 memperlihatkan contoh pengujian dengan benda uji mempunyai sudut serat  $80^\circ$ .



Gambar 4. Benda uji tekan kayu Keruing  $\alpha \leq 30^\circ$ .



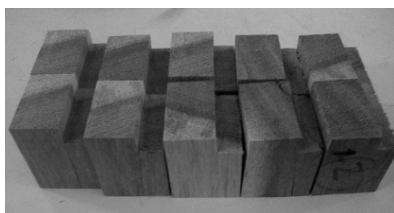
Gambar 5. Benda uji tekan kayu Keruing  $\alpha > 30^\circ$ .



Gambar 6. penguji tekan dengan benda uji kayu Keruing dengan sudut serat kayu sebesar  $0^\circ$  (Pranata et al., 2011).



Gambar 7. penguji tekan dengan benda uji kayu Keruing dengan sudut serat kayu sebesar  $80^\circ$ .



Gambar 8. Benda uji dan ragam kegagalan geser.



Gambar 9. Penguji geser kayu.

Tabel 2. Hasil penguji tekan sejajar serat kayu.

Jenis Kayu	Jumlah Spesimen	Kuat tekan sejajar serat kayu (MPa)
Meranti	9	33,67
Merah	10	55,01
Akasia	7	26,41
Mangium		

Tabel 3. Hasil penguji tekan tegak lurus serat kayu.

Jenis Kayu	Jumlah Spesimen	Kuat tekan tegak lurus serat kayu (MPa)
Meranti	5	7,17
Merah	7	12,55
Akasia	3	6,61
Mangium		

Tabel 4. Hasil penguji geser kayu.

Jenis Kayu	Jumlah Spesimen	Kuat geser kayu (MPa)
Meranti	9	7,55
Merah	8	10,95
Akasia	5	7,43
Mangium		

### Pembahasan untuk Kayu Keruing

Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7 membahas hasil perhitungan kuat tekan berbagai sudut kayu Keruing, yaitu hasil perhitungan dengan prediksi persamaan Hankinson, persamaan PKKI N15, dan persamaan alternatif, yang semuanya divalidasi terhadap hasil penguji eksperimental (selanjutnya disebut Eksp.).

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa secara umum %-relatif perbedaan antara persamaan alternatif dan hasil penguji eksperimental menunjukkan tren yang lebih konservatif dibandingkan persamaan Hankinson dan persamaan PKKI N15.

Tabel 5. Hasil perhitungan dengan persamaan Hankinson dan hasil penguji eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ ( $^\circ$ )	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%relatif perbedaan
		Hankinson	Eksp.	
10	0	55,01	55,01	0,00
1	7	52,38	49,95	4,87
1	8	51,63	43,66	18,26
3	10	49,92	43,37	15,11
2	80	12,85	13,94	-7,84
1	82	12,74	12,92	-1,40
7	90	12,55	12,55	0,00

Tabel 6. Hasil perhitungan dengan persamaan PKKI N15 dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		PKKI N15	Eksp.	
10	0	55,01	55,01	0,00
1	7	49,84	49,95	-0,22
1	8	49,11	43,66	12,48
3	10	47,64	43,37	9,85
2	80	13,19	13,94	-5,37
1	82	12,96	12,92	0,31
7	90	12,55	12,55	0,00

Tabel 7. Hasil perhitungan dengan persamaan alternatif dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		Alternatif	Eksp.	
10	0	55,01	55,01	0,00
1	7	46,09	49,95	-7,72
1	8	44,15	43,66	1,12
3	10	40,37	43,37	-6,92
2	80	12,63	13,94	-9,40
1	82	12,60	12,92	-2,47
7	90	12,55	12,55	0,00

### Pembahasan untuk Kayu Akasia Mangium

Tabel 8. Hasil perhitungan dengan persamaan Hankinson dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		Hankinson	Eksp.	
7	0	26,41	26,41	0,00
3	5	25,82	25,11	2,84
3	10	24,22	24,33	-0,45
3	85	6,65	7,06	-5,85
3	90	6,61	6,61	0,00

Tabel 9. Hasil perhitungan dengan persamaan PKKI N15 dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		PKKI N15	Eksp.	
7	0	26,41	26,41	0,00
3	5	24,68	25,11	-1,70
3	10	22,97	24,33	-5,59
3	85	6,68	7,06	-5,32
3	90	6,61	6,61	0,00

Tabel 10. Hasil perhitungan dengan persamaan alternatif dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		Alternatif	Eksp.	
7	0	26,41	26,41	0,00
3	5	25,31	25,11	0,80
3	10	22,7	24,33	-6,70
3	85	6,73	7,06	-4,67
3	90	6,61	6,61	0,00

Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10 membahas hasil perhitungan kuat tekan berbagai sudut kayu Akasia Mangium, yaitu hasil per-

hitungan dengan prediksi persamaan Hankinson, persamaan PKKI N15, dan persamaan alternatif, yang semuanya divalidasi terhadap hasil pengujian eksperimental. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa secara umum %-relatif perbedaan antara persamaan alternatif dan hasil pengujian eksperimental menunjukkan tren yang lebih konservatif dibandingkan dua persamaan lainnya.

### Pembahasan untuk Kayu Meranti Merah

Tabel 11, Tabel 12, dan Tabel 13 membahas hasil perhitungan kuat tekan berbagai sudut kayu Meranti Merah, yaitu hasil perhitungan dengan prediksi persamaan Hankinson, persamaan PKKI N15, dan persamaan alternatif, yang semuanya divalidasi terhadap hasil pengujian eksperimental. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa secara umum %-relatif perbedaan antara persamaan alternatif dan hasil pengujian eksperimental menunjukkan tren yang lebih konservatif dibandingkan dua persamaan lainnya.

Tabel 11. Hasil perhitungan dengan persamaan Hankinson dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		Hankinson	Eksp.	
9	0	33,67	33,67	0,00
2	5	32,75	31,16	5,10
1	10	30,29	28,55	6,10
3	12	29,03	27,82	4,34
2	60	8,92	8,52	4,73
3	80	7,34	7,68	-4,39
5	90	7,17	7,17	0,00

Tabel 12. Hasil perhitungan dengan persamaan PKKI N15 dan hasil pengujian eksperimental.

Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		PKKI N15	Eksp.	
9	0	33,67	33,67	0,00
2	5	31,36	31,16	0,64
1	10	29,07	28,55	1,81
3	12	28,16	27,82	1,22
2	60	10,71	8,52	25,76
3	80	7,57	7,68	-1,43
5	90	7,17	7,17	0,00

Tabel 13. Hasil perhitungan dengan persamaan alternatif dan hasil pengujian eksperimental.

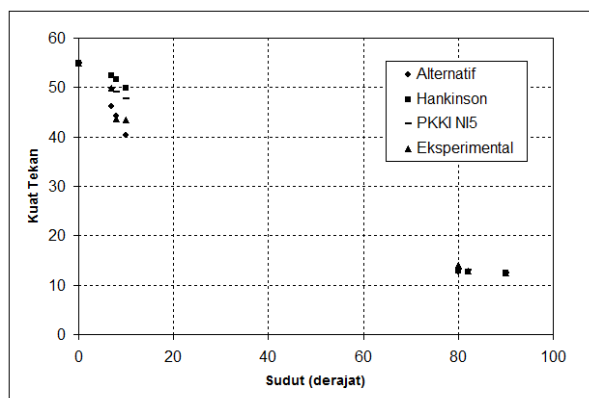
Jumlah Spesimen	Sudut $\alpha$ (°)	Kuat Tekan ( $F_{ca}$ ) Kayu (MPa)		%-relatif perbedaan
		Alternatif	Eksp.	
9	0	33,67	33,67	0,00
2	5	31,49	31,16	1,06
1	10	26,86	28,55	-5,92
3	12	25,00	27,82	-10,14
2	60	8,31	8,52	-2,46
3	80	7,29	7,68	-5,08
5	90	7,17	7,17	0,00

### Pembahasan

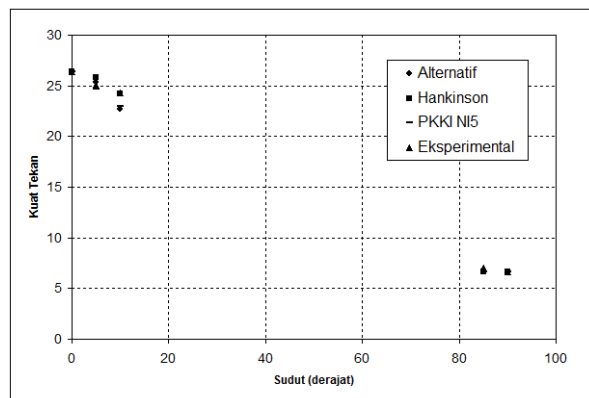
Kuat tekan (sejajar dan tegak lurus serat kayu) yang digunakan didalam memprediksi besarnya kuat tekan bersudut ( $F_{ca}$ ) dengan persamaan Hankinson, persamaan alternatif, dan Persamaan PKKI N15 adalah kuat tekan rata-rata untuk tiap jenis (spesies) kayu, dalam arti menggunakan benda uji yang berbeda dengan benda uji tekan bersudut, walaupun jenis kayunya sama. Secara teori, akan lebih tepat apabila untuk memprediksi kuat tekan ber-

sudut, besarnya kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat kayu juga menggunakan benda uji yang sama. Namun hal ini tidak mungkin dilakukan karena pengujian bersifat destruktif.

Hal ini yang mengakibatkan bahwa untuk beberapa spesimen, %-relatif perbedaan baik itu persamaan Hankinson dan persamaan alternatif mempunyai perbedaan yang cukup besar dibandingkan hasil pengujian eksperimental.

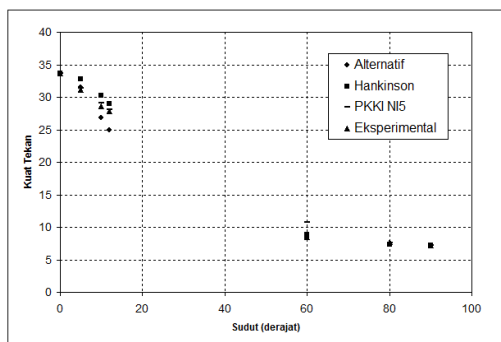


Gambar 10. Kuat tekan bersudut hasil uji eksperimental dan tiga metode persamaan untuk jenis kayu Keruing.



Gambar 11. Kuat tekan bersudut hasil uji eksperimental dan tiga metode persamaan untuk jenis kayu Akasia Mangium.

Persamaan alternatif secara umum dapat memprediksi kuat tekan bersudut lebih dekat terhadap hasil pengujian eksperimental jika dibandingkan dengan persamaan Hankinson dan persamaan PKKI NI5. Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12 memperlihatkan plot rangkuman hasil untuk ketiga metode perhitungan dan hasil pengujian eksperimental tiap-tiap jenis kayu. Terlihat jelas bahwa persamaan alternatif selalu lebih konservatif dan semua metode menunjukkan tren yang sama untuk berbagai sudut arah serat yang ditinjau.



Gambar 12. Kuat tekan bersudut hasil uji eksperimental dan tiga metode persamaan untuk jenis kayu Meranti Merah.

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kuat tekan yang diprediksi menggunakan persamaan alternatif memberikan hasil lebih dekat dan lebih konservatif terhadap data empiris dari hasil uji eksperimental tegangan tekan uniaksial kayu Indonesia kategori *hardwood* dengan berbagai variasi sudut, yaitu meranti merah (*shorea spp.*), kruing (*dipterocarpus spp.*), dan akasia mangium, apabila dibandingkan terhadap perhitungan dengan persamaan Hankinson dan persamaan PKKI NI5.
2. Persamaan alternatif mempertimbangkan pengaruh kuat tekan sejajar dan tegak lurus serat kayu, dan pengaruh kuat geser kayu, didalam memprediksi besarnya kuat tekan bersudut. Hal ini sangat berbeda dengan persamaan Hankinson dan PKKI NI5 yang mana tidak memperhitungkan pengaruh kuat geser kayu.
3. Untuk arah serat mendekati 0 derajat dan 90 derajat, kuat tekan hasil persamaan alternatif dekat dengan persamaan Hankinson dan PKKI NI5. Tetapi untuk arah serat mendekati 45 derajat, perbedaan hasil persamaan alternatif dan Hankinson dan PKKI NI5 sangat besar.
4. Persamaan kegagalan yang berbasis pada kriteria energi distorsi von Mises dapat diusulkan menjadi persamaan alternatif selain persamaan Hankinson.

## DAFTAR PUSTAKA

- ADINA R&D, Inc. (2009). *ADINA version 8.6.2 Theory and Modelling Guide Volume 1*, ADINA R&D, Inc., 71 Elton Ave., Watertown, MA 02472, USA.
- American Society for Testing and Materials. (2008). *Annual Book of ASTM Standards 2008 – Section 4 Volume 04.10 Wood*, American Society for Testing and Materials.
- Ashby, M.F.; Easterling, K.E.; Harrysoon, R.; Malti, S.K. (1985). *The fracture and toughness of woods*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences; 398: 261-280.
- Chen, W.F., Han, D.J. (2007). *Plasticity for Structural Engineers*. Ross Publishing. Lauderdale, FL, USA.
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook Wood As An Engineering Material, General Technical Report FPL-GTR-190*, Forest Products Laboratory, United States Departments of Agriculture.
- Kharouf, N. (2001). *Post-Elastic Behavior of Bolted Connections in Wood*, Ph.D. Dissertation, McGill University, Canada.
- Kharouf, N., McClure, G., Smith, I. (2003). "Elasto-plastic modeling of wood bolted connections." *Journal of Computers and Structures*, Volume 81, Issues 8-11, page 747-754, 2003.
- Kharouf, N., McClure, G., Smith, I. (2005). "Postelastic Behavior of Single and Double-Bolt Timber Connections." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Volume 131 Number 1, Januari 1, 2005.
- Persson, K. (2000). "Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties." Doctoral Thesis, Unpublished, Department of Mechanics and Materials, Lund University, Sweden.
- Pranata, Y.A. (2011). "Perilaku Lentur Balok Laminasi-Baut Kayu Indonesia." Disertasi (tidak dipublikasikan), Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Pranata, Y.A., Suryatmono, B., Tjondro, J.A. (2011). "The Flexural Rigidity Ratio of Indonesian Timber Bolt-Laminated Beam." *The 3<sup>rd</sup> European Asian Civil Engineering Forum*, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia, 20-22 September 2011.

Suryoatmono, B., Pranata, Y.A. (2011). "Distortion Energy Criterion for Uniaxial Tension at an Angle to The Grain, Society of Wood Science and Technology 2011." *International Convention*. Portland, Oregon, Amerika Serikat, June 2011.

Suryoatmono, B., Pranata, Y.A. (2012). "An Alternative To Hankinson's Formula For Uniaxial Tension At An Angle To

The Grain." (akan dipresentasikan pada) *World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand, 16-19 July 2012.

Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. (1961). Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.