

Prediksi Nilai Kuat Lentur Kayu Tropis Berdasarkan Nilai Modulus Elastis

(Prediction of Timber Bending Strength of Tropical Timbers Based on Its Modulus of Elasticity)

Ali Awaludin*, Urwatul Wusqo

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

*Penulis korespondensi: ali.awaludin@ugm.ac.id

Abstract

SNI 7973:2013 classifies the timber grade based on its static modulus of elasticity (MoE_s). The timber mechanical properties, such as timber bending strength (MoR), can be predicted using its static modulus of elasticity. This study focused on obtaining the formulas to predict $E_{0,05}$ and tropical timber bending strength (MoR) based on its MoE_s . The static bending test was conducted following EN 408, and the dynamic timber bending test was performed based on the stress wave velocity method. Furthermore, some bending tests result from the previous researchers were also used in this study. The analysis result shows that the $E_{0,05}$ is about $0,754 E_{0,mean}$. The regression analysis also shows that the formula $MoR = -1.59 + 0.0061MoE_s$ can be used to predict the value of MoR . From this, the bending design values provided in table 4.2.1 (SNI 7973:2013) tend to give a good safety factor. The correlation between dynamic and static modulus of elasticity is expressed by the equation $MoE_d = -1330.1 + 1.254MoE_s$ with the determination coefficient (R^2) reaches 0.69

Keywords: bending strength, dinamyc modulus of elasticity, static modulus of elasticity

Abstrak

Dalam SNI 7973:2013, nilai modulus elastisitas statik kayu (MoE_s) digunakan sebagai dasar pengelompokan mutu kayu. Nilai MoE_s juga dapat digunakan untuk memprediksi sifat mekanika kayu yang lain. Penelitian ini melakukan kajian untuk mendapatkan persamaan yang dapat digunakan untuk memprediksi nilai $E_{0,05}$ berdasarkan nilai rata rata modulus elastisitas dan persamaan untuk mendapatkan nilai kekuatan lentur (MoR) berdasarkan nilai MoE_s nya dari kayu tropis yang ada di Indonesia. Uji lentur statik dilakukan berdasarkan EN 408, sementara itu uji lentur dinamik dilakukan menggunakan metode *stress wave velocity*. Selain itu, data sekunder hasil pengujian lentur dari para peneliti terdahulu juga digunakan dalam penelitian ini. Dari hasil analisis, nilai $E_{0,05}$ adalah sebesar $0,754$ dari $E_{0,mean}$. Analisis regresi linear menunjukkan bahwa nilai MoR dapat didekati dengan persamaan $MoR = -1,359 + 0,0061MoE_s$, dimana dari persamaan ini dapat diketahui bahwa nilai desain acuan yang ada pada Tabel 4.2.1 SNI 7973:2013 cenderung memberikan faktor keamanan yang memadai. Pengujian lentur dinamik kayu menunjukkan bahwa hubungan antara modulus elastisitas dinamik (MoE_d) dan MoE_s dapat didekati melalui persamaan $MoE_d = -1330,1 + 1,254MoE_s$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar $0,69$.

Kata kunci: kekuatan lentur, modulus elastisitas dinamik, modulus elastisitas statik

Pendahuluan

Nilai modulus elastisitas (MoE) dan kekuatan lentur (MoR) kayu merupakan

dua parameter utama yang lazim digunakan untuk memprediksi sifat-sifat mekanika kayu yang lain, seperti kuat

tekan, kuat tarik, dan kuat geser. Salah satu parameter penting yang sering digunakan, terutama dalam perhitungan struktur lentur adalah nilai $E_{0,05}$. EN 338 telah menyediakan persamaan empiris untuk menghitung nilai $E_{0,05}$ dari nilai rata-rata modulus elastisitas yang didapatkan dari pengujian lentur. Namun demikian, persamaan ini belum tentu sesuai apabila diaplikasikan pada kayu tropis yang ada di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan kajian untuk mengetahui kesesuaian persamaan yang ada pada EN 338 terhadap kayu tropis yang ada di Indonesia.

Penentuan kelas/mutu kayu dapat dilakukan dengan berdasarkan kekuatan dan modulus elastisitas kayu. EN 338 mengelompokkan kelas kayu berdasarkan nilai kekuatan lenturnya, sementara SNI 7973:2013 mengelompokkan mutu kayu berdasarkan nilai MoE. Nilai MoE dan MoR pada kayu memiliki keterkaitan satu sama lain, dimana nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari analisis regresi terhadap dua parameter ini berkisar antara 0,45 sampai 0,7596 (Baar *et al.* 2015 ; Baillères *et al.* 2012; Baillères *et al.* 2009; Steiger *et al.* 2010). Menurut Blass (2010), untuk mendapatkan nilai koefisien determinasi yang tinggi, nilai MoE berdasarkan pengujian (*machine grading*) perlu dikombinasikan dengan hasil penilaian secara visual (*visual grading*) yang meliputi pengamatan terhadap adanya mata kayu.

Untuk mendapatkan nilai MoE dan MoR kayu, SNI 03-3539-1995 tentang *Metode Pengujian Kuat Lentur Kayu di Laboratorium* menggunakan benda uji berukuran $(50 \times 50 \times 760)$ mm³ yang diuji dengan metode uji lentur tiga titik (BSN 1995). Sementara itu, banyak penelitian tentang pengujian lentur kayu di

Indonesia yang masih menggunakan standar lain seperti ASTM D143-94, ASTM D198, BS 373:1957, EN 408, dan JIS Z 2113 yang memiliki dimensi benda uji dan metode uji yang berbeda. Pada umumnya, benda uji lentur kayu berukuran kecil (seperti pada BS 373:1957) bebas dari adanya cacat kayu (mata kayu, kemiringan serat, dan retak). Sementara itu, benda uji berukuran besar biasanya mengandung cacat kayu yang dapat mempengaruhi hasil dari uji kuat lentur.

Pengujian lentur untuk mendapatkan nilai MoE dan MoR dapat dilakukan secara statik dan dinamik. Pengujian secara statik umumnya bersifat destruktif, yaitu melalui uji lentur tiga titik maupun empat titik di laboratorium. Pengujian secara dinamik dapat dilakukan dengan memanfaatkan data kecepatan rambat gelombang tegangan (*stress wave velocity*) pada material kayu ketika salah satu ujungnya diberi pukulan kejut, dan pengujian ini bersifat non-destruktif. Pengujian lentur kayu secara dinamik ini lebih efisien, praktis, cepat, serta tidak menyebabkan kerusakan pada kayu. Namun demikian, hasil yang didapatkan dari pengujian kayu secara statik ini seringkali berbeda nilainya dengan hasil dari pengujian lentur secara dinamis. Pengujian terdahulu menunjukkan adanya korelasi yang baik antara MoE yang dihasilkan dari pengujian statik (MoE_s) dan dinamik (MoE_d). Selain itu, nilai modulus elastisitas dari pengujian dinamik biasanya cenderung lebih besar daripada hasil dari pengujian statik (Karlinsari *et al.* 2017; Piao *et al.* 2004; Utami *et al.* 2020). Sementara itu, dalam desain biasanya yang digunakan sebagai nilai acuan dalam adalah hasil dari pengujian lentur secara statik. Oleh karena itu, perlu adanya kajian untuk mendapatkan persamaan yang dapat

digunakan menghubungkan nilai MoE_d dengan nilai MoE_s . Lebih lanjut, persamaan ini nantinya juga dapat dikembangkan menjadi persamaan yang dapat digunakan untuk menghubungkan nilai MoE_d dengan nilai MoR dari kayu untuk kepentingan penggunaan praktis.

Pada penelitian ini, dilakukan uji lentur statik pada sembilan jenis kayu tropis dan uji lentur dinamik pada enam jenis kayu tropis yang ada di Indonesia. Pengujian-pengujian tersebut bertujuan untuk mendapatkan nilai MoE_s , MoE_d , dan nilai kekuatan lentur (MoR) dari beberapa kayu yang ada di Indonesia. Hasil uji lentur yang diperoleh dari penelitian ini dan data hasil uji lentur dari beberapa penelitian sebelumnya diolah menggunakan analisis statistik untuk mendapatkan persamaan empiris yang menghubungkan nilai modulus elastisitas statik (MoE_s) dengan nilai kuat lentur (MoR) dari kayu tropis yang ada di Indonesia. Pada nilai MoE yang sama, nilai MoR dari persamaan empiris yang dihasilkan dibandingkan dengan nilai MoR yg disajikan dalam SNI 7973:2013 untuk mengetahui seberapa besar tingkat keamanan yang diberikan oleh SNI 7973:2013. Adanya perbedaan standar pengujian yang diacu pada saat uji lentur pada penelitian ini dengan penelitian terdahulu juga dikaji lebih lanjut. Selain itu, makalah ini secara khusus menyajikan bahasan tentang korelasi data pengukuran MoE_s dengan MoE_d .

Metode

Prediksi sifat mekanika kayu

EN 338 menyediakan beberapa persamaan untuk mendapatkan parameter sifat mekanika kayu berdasarkan nilai MoE dan MoR kayu. Dalam EN 338, nilai persentil ke-5 dari modulus elastisitas kayu sejajar serat dapat diprediksi

berdasarkan nilai rerata modulus elastisitasnya, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1) (Anonim, 2003) .

$$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean} (softwood) \quad (1.a)$$

$$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean} (hardwood) \quad (1.b)$$

dengan $E_{0,05}$ = nilai persentil ke-5 dari modulus elastisitas kayu sejajar serat, $E_{0,mean}$ = nilai rata-rata modulus elastisitas kayu sejajar serat.

Kayu jenis *hardwood* merupakan tumbuhan *angiospermae* (tumbuhan berbiji tertutup), memiliki daun yang berukuran lebar, dan biasanya menggugurkan daunnya pada saat musim kemarau. Kayu jenis *hardwood* memiliki struktur sel yang lebih kompleks dibandingkan *softwood*, dimana sebagian besar volume kayunya disusun oleh sel serat yang memberikan dukungan struktural pada batang kayu *hardwood* (Bond 2002). Dilihat dari ciri-ciri fisiknya, sebagian besar kayu tropis yang banyak tumbuh dan dimanfaatkan untuk komponen konstruksi di Indonesia dapat dikategorikan sebagai *hardwood*.-EN 338 juga menyediakan persamaan untuk memprediksi nilai modulus elastisitas tegak lurus serat dan modulus geser kayu berdasarkan nilai modulus elastisitas sejajar serat. Sementara itu, nilai kuat tarik sejajar serat, kuat tekan sejajar serat, serta kuat geser dapat diprediksi menggunakan nilai kuat lentur (MoR).

Pengujian lentur balok kayu

Pengujian empat titik dilakukan pada balok kayu sesuai dengan EN 408, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack*. Besarnya beban yang diberikan pada benda uji diukur menggunakan *load cell*, sedangkan lendutan vertikal yang terjadi di tengah bentang diukur menggunakan

dua buah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*). Balok kayu yang diuji pada posisi rebah memiliki dimensi (60×120×1230) mm³. Keberadaan cacat kayu berupa mata kayu dan kemiringan serat dimungkinkan pada benda uji mengingat ukuran benda uji termasuk ukuran struktur dimana keberadaan cacat kayu sulit dihindari. Namun, dalam penelitian ini keberadaan cacat kayu tidak diperhitungkan dalam proses analisis. Pengujian lentur statik dilakukan sampai benda uji mengalami kerusakan pada sembilan jenis kayu: Akasia (*Acacia mangium*), Mahoni (*Swietenia mahogany*), Munggur (*Samanea saman*), Sukun (*Artocarpus altilis*), Sonokeling (*Dalbergia latifolia*), Jati (*Tectona grandis*), Durian (*Durio zibethinus*), Surian (*Toona sureni*), dan Wadang (*Pterospermum javanicum*). Selain itu, uji lentur dengan standar SNI 03-3539-1995 juga dilakukan pada empat jenis kayu meliputi kayu Keruing (*Dipterocarpus retusus*), Bangkirai (*Shorea laevis Ridl*), Kamper

(*Cinnamomum camphora*), dan Balau (*Shorea spp.*). Benda uji kayu ini memiliki dimensi (50×50×760) mm³, dan diuji dengan metode uji lentur tiga titik. Sementara itu, hanya enam jenis kayu tropis yang diuji lentur dinamik, yaitu kayu Akasia, Mahoni, Munggur, Sukun, Sonokeling, dan Jati. Besarnya nilai modulus elastisitas dari kayu dapat dihitung menggunakan Persamaan (2) (Anonim, 2004).

$$MoE_s = \frac{\alpha l_1^2 (F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (2)$$

dimana α adalah jarak antara titik pembebanan dengan tumpuan, l_1 adalah panjang bentang, dan I adalah momen inersia penampang balok. Pada Persamaan (2), nilai $F_2 - F_1$ menunjukkan kenaikan beban, sementara $w_2 - w_1$ menunjukkan kenaikan lendutan vertikal. Data nilai beban dan lendutan yang berkesesuaian ini diambil pada rentang pembebanan 10% sampai 40% dari beban puncak hasil pengujian lentur statik.



Gambar 1 Pengujian lentur statik balok kayu.



Gambar 2 Pengujian lentur dinamik balok kayu.

Sebelum pengujian lentur, juga dilakukan pengujian *stress wave velocity* untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamik (MoE_d) seperti dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai MoE_d dihitung berdasarkan Persamaan (3), dimana f_0 adalah nilai frekuensi terukur dari gelombang tegangan dalam satuan kHz, L adalah panjang batang kayu dalam satuan meter, dan ρ adalah nilai kerapatan kayu dalam satuan kg/m^3 (Divós & Tanaka 2005). Asumsi material yang berperilaku homogen digunakan dalam penghitungan MoE_d .

$$MoE_d = 4f_0^2 L^2 \rho \quad (3)$$

Pengumpulan data

Pengumpulan data sekunder pengujian lentur kayu tropis yang ada di Indonesia, meliputi modulus elastisitas statik, modulus elastisitas dinamik, dan kuat lentur dari penelitian terdahulu dilakukan, dimana data-data tersebut secara lengkap disajikan pada Tabel 1. Selain itu, hasil pengujian lentur berupa nilai MoE dan MoR dari penelitian ini juga ditampilkan pada Tabel 1. Pengujian dilakukan berdasarkan berbagai macam standar dengan dimensi dan metode benda uji yang berbeda-beda seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 1 Hasil pengujian lentur kayu tropis di Indonesia

Jenis kayu	Sifat mekanika			Standar pengujian lentur kayu
	MoE_s (MPa)	MoE_d (MPa)	MoR (MPa)	
Mangium, Akasia (<i>Acacia mangium</i>)	8808 ^a		63,89 ^a	ASTM D143-94
	8900 ^b		42,2 ^b	ASTM D-198
	7848 ^c	24161 ^c	86,73 ^c	BS 373:1957
	8069	8345	58,64	EN 408
Kayu Kalimantan	15300 ^b		62,80 ^b	ASTM D-198
Meranti, (<i>Shorea sp</i>)	14900 ^b		55,10 ^b	ASTM D-198
	5121 ^c	11027 ^c	50,27 ^c	BS 373:1957
Kapur	14200 ^b		56,10 ^b	ASTM D-198
Kamper (<i>Cinnamomum camphora</i>)	14784 ^d		44,69 ^d	ISO 1329-1975
	13497		70,42	SNI 03-3539-1995

Jenis kayu	Sifat mekanika			Standar pengujian lentur kayu
	MoE _s (MPa)	MoE _d (MPa)	MoR (MPa)	
Sengon (<i>Paraserianthes falcata</i>)	8700 ^b 3117 ^c		32,70 ^b 35,75 ^c	ASTM D-198 BS 373:1957
Karet (<i>Hevea brasiliensis</i>)	10600 ^b		43,90 ^b	ASTM D-198
Kayu Afrika, Manii (<i>Maesopsis eminii</i>)	12000 ^b 6880 ^c	15779 ^c	45,80 ^b 73,89 ^c	ASTM D-198 BS 373:1957
Pinus (<i>Pinus merkusii</i>)	12900 ^b 10385 ^c	29008 ^c	34,20 ^b 82,14 ^c	ASTM D-198 BS 373:1957
Damar, Agathis (<i>Agathis</i>)	12000 ^b 8395 ^c	8395 ^c	44,60 ^b 69,91 ^c	ASTM D-198 BS 373:1957
Samama (<i>Antocephalus macrophylus Roxb</i>)	4760 ^e		50,86 ^e	BS 373:1957
Lulu (<i>Celtis latifolia Planc</i>)	10297 ^f		161,0 ^f	Benda uji (20×20×360) mm ³
Jabon merah (<i>Antocephalus macrophylus (Roxb) Havil</i>)	7274 ^g		66,53 ^g	JIS Z 2113
Ulin (<i>Eusideroxylon Zwageri</i>)	5574 ^h		85,92 ^h	ASTM D143
Durian (<i>Durio zibethinus</i>)	7842 ⁱ 7595		53,99 ⁱ 36,53	BS 373:1957 EN 408
Kecapi (<i>Sandoricum koetjape Merr</i>)	6210 ⁱ		52,33 ⁱ	BS 373:1957
Mahoni (<i>Swietenia mahogany</i>)	5869	5257	35,78	EN 408
Munggur, Trembesi, Suar (<i>Samanea saman</i>)	4367	4635	30,41	EN 408
Sukun (<i>Artocarpus altilis</i>)	4352	3526	20,66	EN 408
Sonokeling (<i>Dalbergia latifolia</i>)	7040	8592	49,92	EN 408
Jati (<i>Tectona grandis</i>)	9982		60,73	EN 408
Surian (<i>Toona sureni</i>)	6774		40,33	EN 408
Wadang (<i>Pterospermum javanicum</i>)	5951		31,73	EN 408
Keruing (<i>Dipterocarpus retusus</i>)	12931		84,74	SNI 03-3539-1995
Bangkirai (<i>Shorea laevis Ridl</i>)	16097		114,07	SNI 03-3539-1995
Balau (<i>Shorea spp.</i>)	14396		91,35	SNI 03-3539-1995

Keterangan:

^a(Hadjib *et al.* 2007)

^b(Firmanti *et al.* 2005)

^c(Karlinsari *et al.* 2006)

^d(Oka 2009)

^e(Cahyono *et al.* 2012)

^f(Wahyudi *et al.* 2017)

^g(Lempang 2014)

^h(Pranata & Palapessy 2014)

ⁱ(Syamani *et al.* 2012)

Tabel 2 Dimensi benda uji lentur pada beberapa standar pengujian

Standar pengujian	Dimensi benda uji			Metode pengujian
	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Panjang (mm)	
SNI 03-3539-1995	50	50	760	Uji lentur 3 titik
ASTM D143-94	25	25	410	Uji lentur 3 titik
	50	50	760	
ASTM D-198	120	60	3000	Uji lentur 4 titik
BS 373:1957	20	20	300	Uji lentur 3 titik
EN 408:2004	120	60	1200	Uji lentur 4 titik

Setelah semua data terkumpul, analisis statistik dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai MoE_s dan MoR kayu tropis yang ada di Indonesia. Data pencilan (*outliers*) dari masing-masing hasil pengujian tidak diikutsertakan dalam analisis regresi agar data yang dihasilkan tidak bersifat bias. Analisis regresi dilakukan terlebih dahulu pada satu kelompok data hasil uji lentur. Selanjutnya, analisis terhadap data pencilan dengan menggunakan metode *standardized residual* dilakukan untuk menghilangkan data pencilan. Adapun data pencilan merupakan data yang memiliki nilai mutlak residual $|r_i|$ lebih dari dua, atau secara matematis digambarkan pada Persamaan (4).

$$r_i = \frac{e_i}{s\sqrt{(1-h_{ii})}} \quad (4)$$

Keseluruhan data uji lentur yang tidak mengandung data pencilan dikompilasi dan dianalisis. Analisis regresi pada data-data ini dilakukan guna mendapatkan persamaan empiris untuk memprediksi nilai MoR kayu berdasarkan nilai MoE_s dan nilai koefisien determinasi (R^2). Apabila nilai (R^2) semakin mendekati 1, maka dapat dikatakan bahwa model/persamaan yang didapatkan semakin akurat. Setelah garis regresi yang menghubungkan antara nilai MoE dan MoR didapatkan, dicari persamaan garis regresi dengan batas bawah 5% (*exclusion limit* 5%). Apabila β_1 merupakan kemiringan garis regresi yang didapatkan, maka persamaan garis regresi

dengan batas bawah 5% (*exclusion limit* 5%) dapat dicari menggunakan Persamaan (5) – (8).

$$y = \bar{\beta}_0 + \beta_1 x \quad (5)$$

$$\bar{\beta}_0 = \beta_0 \pm t \cdot s_e \quad (6)$$

$$s_e = s_{YX} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (7)$$

$$s_{YX} = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - \bar{\beta}_0 \sum Y - \bar{\beta}_1 \sum XY}{n - k - 1}} \quad (8)$$

dengan adalah nilai t kritis distribusi t , nilai s_e adalah nilai *standard error of estimate*, dan nilai k merupakan orde polinomial dari sejumlah data n yang digunakan.

Hasil dan Pembahasan

Kesesuaian prediksi nilai persentil ke 5 modulus elatisitas (MoE) berdasarkan EN 338 terhadap kayu tropis di Indonesia

Dalam EN 408, Nilai $E_{0,05}$ didefinisikan sebagai nilai persentil ke 5 dari MoE hasil pengujian lentur. Nilai ini tidak selalu digunakan dalam perhitungan desain struktur kayu. Namun demikian, nilai $E_{0,05}$ ini diperlukan dalam perhitungan struktur lentur. Dalam SNI 7973:2013 terdapat nilai E_{min} yang pada proses untuk mendapatkannya menggunakan data nilai $E_{0,05}$ meskipun tidak disebutkan secara spesifik. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan nilai $E_{0,05}$ dari sembilan jenis

kayu tropis yang diuji menggunakan standar EN 408. Prosedur yang digunakan untuk mendapatkan nilai $E_{0,05}$ ini adalah dengan menggunakan kaidah statistik secara umum. Nilai $E_{0,05}$ yang didapatkan berkisar antara 0,596 sampai 0,894 $E_{0,mean}$, dimana untuk keseluruhan sampel kayu yang diuji rata-ratanya memberikan persamaan $E_{0,05} = 0,754 E_{0,mean}$. Dalam EN 338, nilai $E_{0,05}$ untuk kayu yang termasuk dalam kategori *hardwood* dapat didekati dengan persamaan $E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$. Dengan demikian, persamaan yang ada pada EN 338 masih dalam rentang yang dihasilkan dari penelitian ini.

Hubungan antara Nilai Modulus Elastisitas Statis (MoEs) Kayu dengan Kuat Lentur Kayu (MoR)

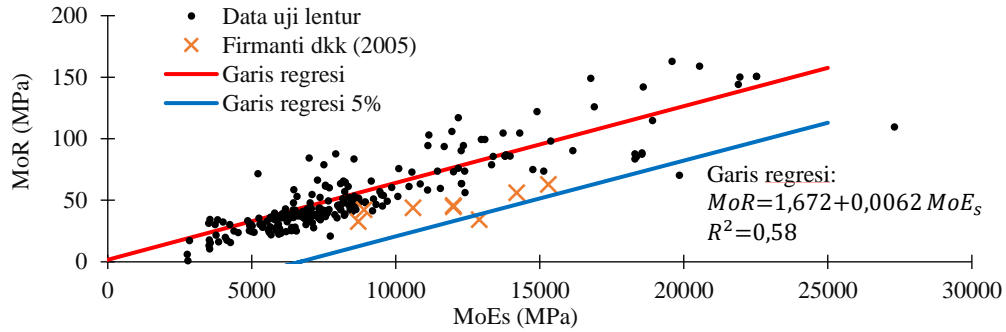
Sebanyak 259 pasangan data MoEs dan MoR didapatkan dalam proses penelitian ini untuk selanjutnya dicari hubungan antara kedua variabel ini melalui analisis regresi. Pasangan data MoEs dan MoR ini dikelompokkan berdasarkan dimensi (panjang) benda uji lentur, sehingga didapatkan beberapa variasi hasil analisis regresi yang hasilnya dapat dilihat pada

Gambar 2 dan Tabel 4. Data yang dihasilkan oleh Firmanti *et al.* (2005) juga ditampilkan pada Gambar 3, meskipun dalam analisis regresi untuk menghasilkan Gambar 3(c) data tersebut tidak diikutsertakan.

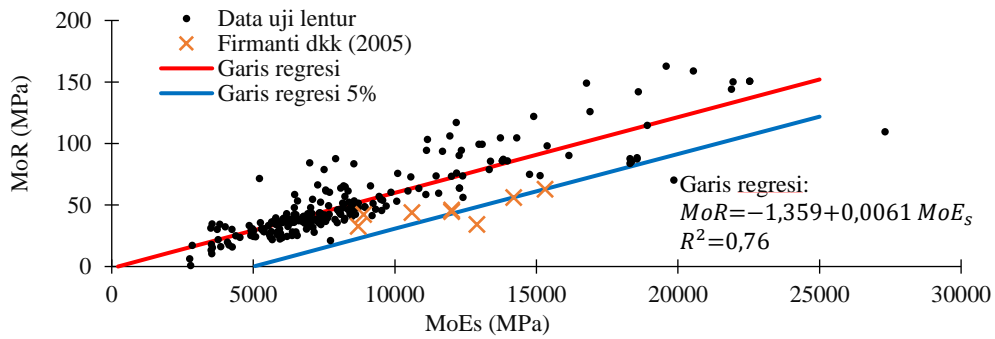
Gambar 2(a) hingga 3(d) menunjukkan bahwa nilai MoE berkorelasi positif terhadap nilai MoR kayu, dengan nilai R^2 berkisar antara 0,55 hingga 0,76, meskipun data yang digunakan memiliki ukuran benda uji dan metode uji yang berbeda-beda. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang didapatkan dari analisis regresi sejalan dengan hasil penelitian dari para peneliti terdahulu, yang berkisar antara 0,45 sampai 0,76 (Baar *et al.* 2015; Baillères *et al.* 2012; Baillères *et al.* 2009). Diantara 4 garis regresi yang didapatkan, analisis regresi yang hanya mengikutsertakan benda uji dengan ukuran 0,76 m keatas memberikan koefisien determinasi yang paling tinggi. Dengan demikian, hasil analisis regresi dari kategori inilah yang dinilai cocok untuk digunakan dalam memprediksi nilai MoR kayu tropis yang ada di Indonesia berdasarkan nilai MoEsnya.

Tabel 3 Nilai Persentil ke-5 modulus elastisitas kayu yang diuji menggunakan standar EN408

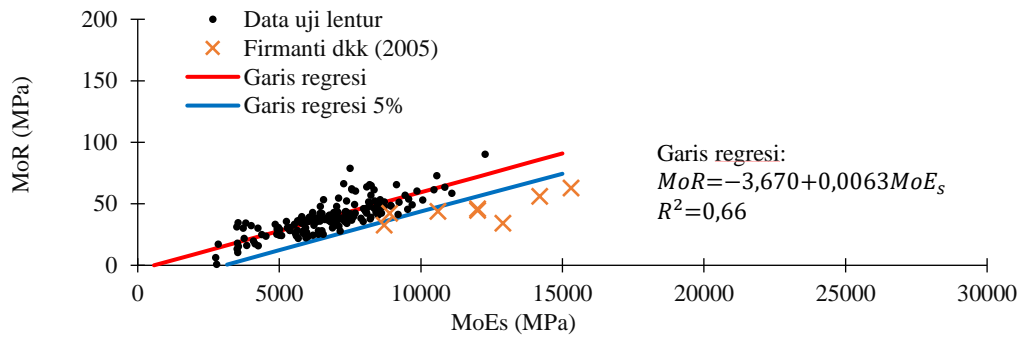
Kayu	Jumlah benda uji	$E_{0,mean}$ (MPa)	$E_{0,05}$ (MPa)	Persamaan
Akasia	10	8069	7215	$E_{0,05} = 0,894 E_{0,mean}$
Mahoni	10	5869	4113	$E_{0,05} = 0,701 E_{0,mean}$
Munggur	10	4367	3517	$E_{0,05} = 0,805 E_{0,mean}$
Sonokeling	9	7822	6676	$E_{0,05} = 0,854 E_{0,mean}$
Sukun	9	4369	2762	$E_{0,05} = 0,632 E_{0,mean}$
Jati	10	9982	7682	$E_{0,05} = 0,770 E_{0,mean}$
Durian	34	7591	5542	$E_{0,05} = 0,730 E_{0,mean}$
Surian	36	6797	5337	$E_{0,05} = 0,785 E_{0,mean}$
Wadang	40	5951	3549	$E_{0,05} = 0,596 E_{0,mean}$
Rata rata				$E_{0,05} = 0,752 E_{0,mean}$



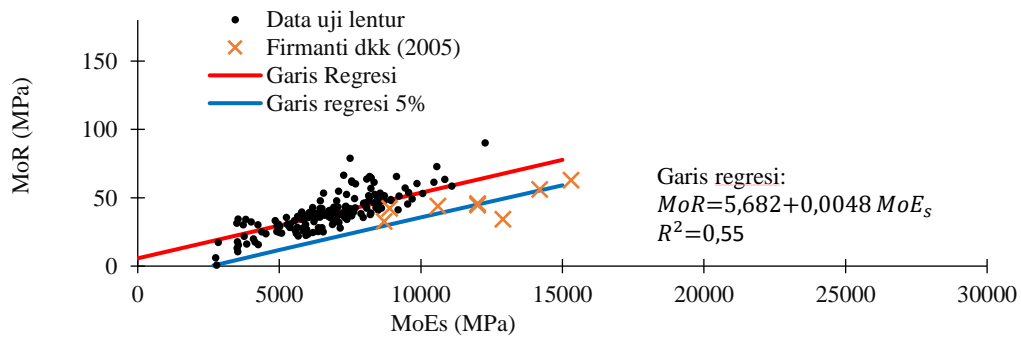
(a)



(b)



(c)

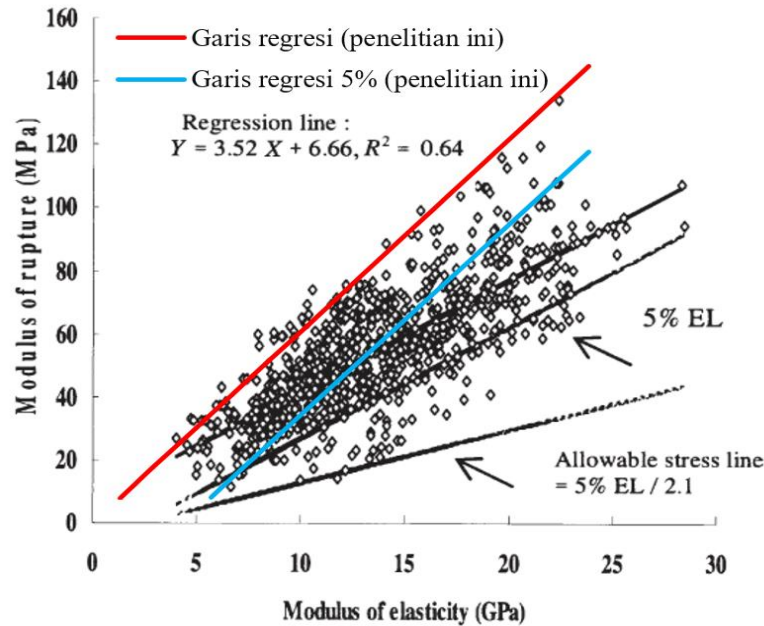


(d)

Gambar 2 Grafik hubungan antara MoEs dan MoR pada: a) Semua data uji lentur, b) Data uji lentur dengan panjang minimal 0,76 m, c) Data uji lentur dengan panjang 1-2 m, dan d) Data uji lentur dengan panjang lebih dari 1 m.

Tabel 4 Hasil analisis regresi

Kategori	Jumlah data, n	Koefisien determinasi, R^2	Persamaan regresi
Semua data	259	0,58	$MoR=1,672+0,0062 MoE_s$
$0,76 \leq L$	233	0,76	$MoR=-1,359+0,0061 MoE_s$
$1 < L < 2m$	169	0,66	$MoR=-3,670+0,0063 MoE_s$
$1m < L$	177	0,55	$MoR=5,682+0,0048 MoE_s$



Gambar 3 Plot garis regresi dari penelitian ini terhadap garis regresi yang didapatkan oleh Firmanti *et al.* (2005).

Pemilihan persamaan regresi ini tidak hanya berdasarkan nilai R^2 nya saja, namun juga dengan pertimbangan bahwa pada kategori ini pengaruh adanya cacat kayu (mata kayu dan kemiringan serat) pada benda uji telah terakomodir dalam pengujian lentur yang dilakukan. pengaruh adanya cacat kayu tidak akan ditemui pada sampel berukuran kecil.

Sebelumnya, Firmanti *et al.* (2005) juga telah melakukan analisis statistik untuk mendapatkan persamaan regresi yang menunjukkan hubungan antara MoE_s dan MoR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Garis yang didapatkan dari kajian ini lebih tegak dibandingkan garis regresi hasil kajian Firmanti *et al.* (2005).

Pada nilai MoE yang sama, garis regresi dari Firmanti *et al.* (2005) akan memberikan nilai MoR yang lebih rendah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh penggunaan dimensi benda uji yang berbeda, dimana pada penelitian Firmanti *et al.* (2005) digunakan benda uji lentur yang lebih panjang (3 m).

Hubungan antara nilai modulus elastisitas statik (MoE_s) dengan modulus elastisitas dinamik (MoE_d) kayu

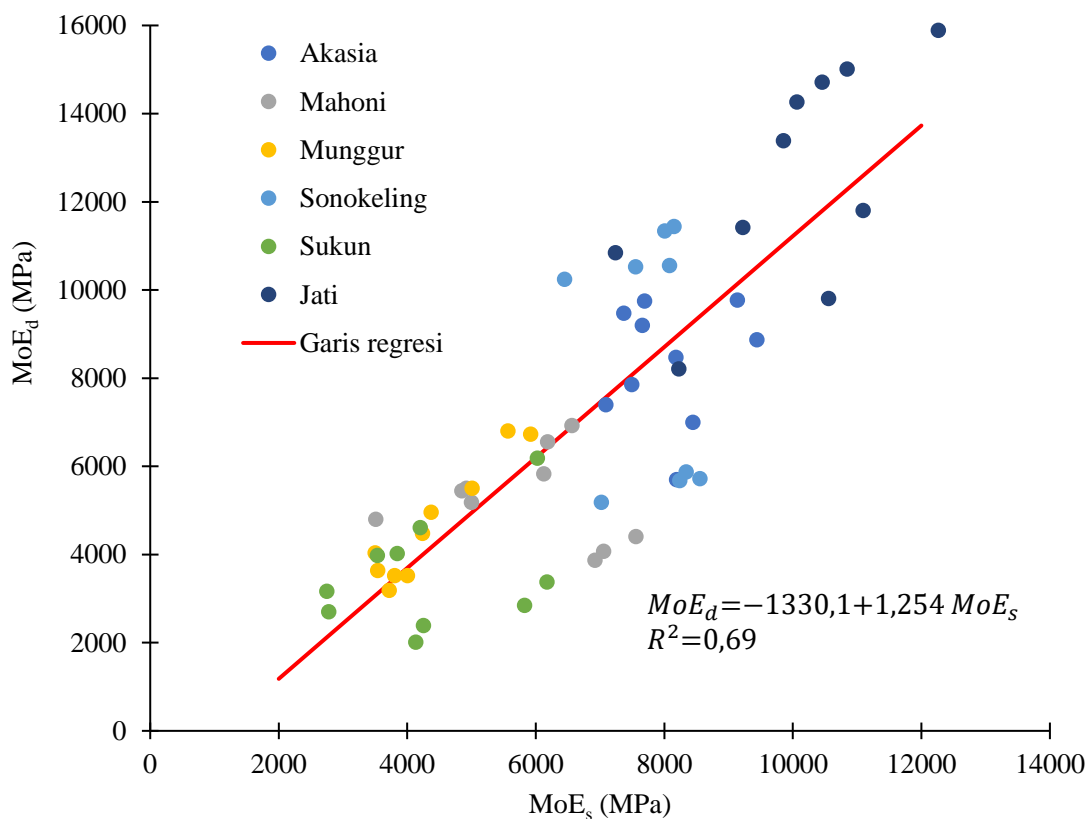
Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara modulus elastisitas statik (MoE_s) dengan modulus elastisitas dinamik (MoE_d) dari enam jenis kayu tropis yang

ada di Indonesia, meliputi kayu Akasia, Mahoni, Munggur, Sonokeling, Sukun, dan Jati. Perbandingan antara nilai MoE_d terhadap MoE_s berkisar antara 0,49 hingga 1,59. Dari analisis regresi yang dilakukan, didapatkan persamaan regresi $MoE_d = -1330,1 + 1,254 MoE_s$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,69.

Prediksi nilai kekuatan lentur (MoR) berdasarkan nilai modulus elastisitas statis (MoEs) kayu

Tabel 5 menunjukkan nilai faktor keamanan dari MoR terhadap nilai kuat lentur desain acuan yang ada pada Tabel

4.2.1 SNI 7973:2013. Nilai faktor keamanan didapatkan dengan membagi nilai MoR (berdasarkan garis regresi 5% /*exclusion limit* 5%) dengan nilai kuat lentur desain acuan yang sudah dikalikan dengan faktor koreksi format. Dari Tabel 5, terlihat bahwa nilai rasio antara MOR yang didapatkan dari kajian ini dengan nilai kuat lentur yang diberikan dalam SNI 7973:2013 memiliki nilai yang tidak seragam, berkisar antara 1,11 hingga 1,96. Hal ini menunjukkan bahwa nilai kuat lentur desain acuan yang ada pada SNI 7973:2013 memberikan faktor keamanan yang cukup.



Gambar 4 Hubungan antara modulus elastisitas statis (MoE_s) dan modulus elastisitas dinamik (MoE_d).

Tabel 5 Perbandingan nilai MoR dari kajian ini terhadap nilai kuat lentur desain acuan pada SNI 7973:2013

MOE	SNI 7973:2013		Penelitian ini	
	f_b	$f_b \square KF$	MoR	Rasio MoR (4)/(3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
26000	26,00	66,04	127,66	1,93
25000	24,40	61,98	121,56	1,96
24000	23,20	58,93	115,46	1,96
23000	22,00	55,88	109,36	1,96
22000	21,30	54,10	103,26	1,91
21000	19,70	50,04	97,16	1,94
20000	18,50	46,99	91,06	1,94
19000	17,30	43,94	84,96	1,93
18000	16,50	41,91	78,86	1,88
17000	15,00	38,10	72,76	1,91
16000	13,80	35,05	66,66	1,90
15000	12,60	32,00	60,56	1,89
14000	11,80	29,97	54,46	1,82
13000	10,60	26,92	48,36	1,80
12000	9,10	23,11	42,26	1,83
11000	7,90	20,07	36,16	1,80
10000	7,10	18,03	30,06	1,67
9000	5,50	13,97	23,96	1,72
8000	4,30	10,92	17,86	1,64
7000	3,10	7,87	11,76	1,49
6000	2,00	5,08	5,66	1,11

Konsistensi nilai modulus elastisitas statik (MoE_s) dengan modulus elastisitas dinamik (MoE_d) kayu

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas dinamik kayu cenderung lebih besar dibanding dengan nilai modulus elastisitas statiknya, namun besarnya perbedaan yang dihasilkan tergantung pada metode yang digunakan dalam pengukuran MoE_d. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Karlinasari *et al.* (2006, 2012) pada beberapa kayu tropis yang ada di

Indonesia, menunjukkan bahwa penggunaan metode ultrasonik menghasilkan MoE_d sebesar dua hingga tiga kali lipat dari nilai MOE_s. Pada penelitian ini, didapatkan nilai MoE_d sebesar 0,49 hingga 1,59 kali lipat dari MoE_s.

Dari hasil analisis dalam penelitian ini, hubungan antara MoE_d dan MoE_s digambarkan melalui persamaan $MoE_d = -1330,1 + 1,254 MoE_s$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,69. Terdapat beberapa faktor yang dapat

mempengaruhi besarnya nilai R^2 , salah satunya adalah sensitifitas alat ukur dan kondisi ruang pengujian. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Utami *et al.* (2020) menunjukkan bahwa nilai R^2 yang dihasilkan bisa mencapai 0,827. Selanjutnya, studi yang dilakukan oleh Simic *et al.* (2019) juga menunjukkan bahwa dimensi penampang yang digunakan dalam pengukuran MoE_d juga mempengaruhi besarnya R^2 yang dihasilkan. Analisis regresi linear terhadap MoE_s dan MoE_d pada balok dengan penampang ($35 \times 75 \text{ mm}^2$) dan ($44 \times 100 \text{ mm}^2$) masing-masing memiliki nilai R^2 sebesar 0,356 dan 0,635.

Pengaruh perbedaan volume benda uji terhadap hasil pengujian kekuatan lentur (MoR) dan modulus elastisitas statik (MoES) kayu

Perbedaan hasil pengujian lentur kayu yang sejenis dengan menggunakan standar uji yang berbeda terlihat dengan jelas pada Tabel 1. Benda uji yang diuji menggunakan sampel kecil (BS 373:1957) memberikan nilai MoE_s dan MoR yang lebih besar dibanding dengan sampel yang diuji menggunakan standar yang lain. Perbedaan yang signifikan terlihat pada nilai MoR yang didapatkan. Sebagai contoh pada Kayu Durian, nilai MoR sampel yang diuji menggunakan standar BS 373:1957 bernilai 47,80% lebih besar dibandingkan nilai MoR sampel yang diuji dengan menggunakan standar EN 408. Sementara itu, nilai MoE sampel yang diuji menggunakan standar BS 373:1957 hanya bernilai 3,25% lebih besar dibanding dengan yang diuji menggunakan standar EN 408. Ukuran benda uji pada sampel yang diuji berdasarkan BS 373:1957 relatif lebih kecil dibandingkan standar uji yang lain, sehingga besar kemungkinan untuk mendapatkan sampel yang bebas dari

adanya cacat kayu. Hal ini dapat menyebabkan hasil pengujian yang didapatkan dari metode BS 373:1957 lebih besar dibandingkan standar uji yang lain.

Perbedaan ukuran benda uji yang digunakan dapat memberikan hasil sifat mekanika lentur yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Jamil *et al.* (2013) menunjukkan bahwa hasil pengujian lentur dengan spesimen kecil (penampang $50 \times 50 \text{ mm}^2$) memiliki nilai MoR yang cenderung lebih besar dibandingkan spesimen berukuran besar (penampang $50 \times 100 \text{ mm}^2$). Namun demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terihat selisih/perbedaan yang konsisten antara MoR yang didapatkan melalui pengujian dengan spesimen kecil dengan spesimen besar. Sebaliknya, nilai MoE_s pada spesimen berukuran besar lebih tinggi dibanding dengan spesimen kecil. Untuk spesimen berupa kayu tropis yang ada di Malaysia, garis regresi yang menghubungkan antara nilai MoE_s spesimen kecil dan spesimen besar memberikan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,6365 (Jamil *et al.* 2013).

Kajian ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh oleh para peneliti terdahulu, sehingga adanya perbedaan hasil pengujian kayu juga dapat disebabkan oleh beberapa faktor lain. Kadar air pada kayu memberikan pengaruh yang nyata terhadap sifat mekanis kayu (Wahyudi *et al.* 2017), sementara asal/sumber (provenans) dari kayu tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap sifat mekanis kayu (Hadjib *et al.* 2007). Perbedaan metode pengujian juga dapat memberikan perbedaan hasil MoE_s dan MoR . Penelitian yang dilakukan oleh Hein. (2018) menunjukkan bahwa nilai MoE_s dan MoR pada sampel kayu yang sama dari uji lentur 3 titik lebih besar

dibandingkan hasil yang didapatkan dari uji lentur 4 titik. Nilai MoR hasil uji lentur 3 titik mencapai 5,2% lebih besar dibanding dengan nilai MoR hasil uji lentur 4 titik.

Kesimpulan

Dalam SNI 7973:2013, nilai modulus elastisitas statik kayu (MoE_s) digunakan sebagai dasar pengelompokan mutu kayu. Nilai MoE_s ini dapat digunakan untuk memprediksi sifat mekanika dari kayu untuk penggunaan praktis. Dari hasil analisis yang dilakukan, didapatkan persamaan pendekatan untuk menghitung nilai $E_{0,05}$ yaitu sebesar $0,754 E_{0,mean}$. Selanjutnya, nilai kuat lentur (MoR) dapat didekati dengan persamaan $MoR = -1,359 + 0,0061 MoE_s$. Apabila membandingkan nilai MoR dari persamaan ini dan nilai desain acuan yang ada pada tabel 4.2.1 SNI 7973:2013, maka SNI 7973:2013 cenderung memberikan faktor keamanan yang cukup. Dari hasil analisis regresi, hubungan antara modulus elastisitas dinamik (MoE_d) dan MoE_s dapat didekati melalui persamaan $MoE_d = -1330,1 + 1,254 MoE_s$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,69. Beberapa faktor yang mempengaruhi konsistensi nilai MoE_d terhadap nilai MoE_s antara lain sensitifitas alat ukur, kondisi ruang pengujian, dan dimensi benda uji. Pengujian lentur statik yang dilakukan dengan berbagai standaryang berbeda juga dapat menghasilkan nilai MoE_s dan MoR yang berbeda, karena ukuran benda uji, adanya cacat kayu, besarnya kadar air, serta metode uji (uji lentur 3 titik atau 4 titik) juga mempengaruhi hasil yang didapatkan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

dengan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada yang mendukung penelitian ini melalui program Integrated Water Resources Management (IWRM).

Daftar Pustaka

- Baar J, Tippner J, Rademacher P. 2015. Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* .17(2): 239–52.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2013. *SNI 7973:2013 Spesifikasi Desain untuk Konstruksi Kayu*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 1995. *SNI 03-3539-1995 Metode Pengujian Kuat Lentur Kayu Di Laboratorium*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bailleres, H, Hopewell G, Boughton G. 2009. *MOE and MOR Assessment Technologies for Improving Graded Recovery of Exotic Pines in Australia*. Victoria: Forest & Wood Products Australia.
- Baillères H, Hopewell G, Boughton G, Brancheriau L. 2012. Strength and stiffness assessment technologies for improving grading effectiveness of radiata pine wood. *BioResources* 7(1): 1264–82.
- Blass, Hans J. 2010. “Facts You Should Know About.” In *World Conference on Timber Engineering*, Trentino, Italy.
- Bond B. 2002. *Wood Identification for Hardwood and Softwood Species Native to Tennessee*. Knoxville: University of Tennessee.
- Cahyono T D, Ohorella S, Febrianto F. 2012. Sifat fisis dan mekanis kayu

- samama (*Antocephalus macrophylus Roxb.*) dari Kepulauan Maluku. *JITKT*. 10(1): 28–39.
- Divós F, Tanaka T. 2005. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. *Acta Silv. Lign. Hung.* Vol 1(2005): 105–10.
- Firmanti A, Bachtiar E T, Surjokusumo S, Komatsu K, Kawai S. 2005. Mechanical stress grading of tropical timbers without regard to species. *J. Wood. Sci.* 51(4): 339–47.
- Hadjib N, Hadi Y S, Setyaningsih S. 2007. Sifat fisis dan mekanis sepuluh provenans kayu mangium (*Acacia mangium Willd*) dari Parung Panjang, Jawa Barat. *JITKT*. 5(1): 7–11.
- Jamil A W M, Zamin J M, Omar M K M. 2013. Relationship between mechanical properties of structural size and small clear specimens of timber. *JITKT*. 25(1): 12–21.
- Pranata Y A, Palapessy J G. 2014. Kekuatan lentur, MOE, dan MOR kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*). *Jurnal Teknik Sipil*. 13(1): 25–31.
- Karlinasari L, Iksan M F, Hermawan D, Maddu A, Firmanti A. 2017. Nondestructive bending strength testing of wood wool cement board from some fast growing species using stress wave velocity method. *JITKT*. 9(2): 172–81.
- Karlinasari L, Baihaqi H, Akhiruddin M, Mardikanto T R. 2012. The acoustical properties of Indonesian hardwood species. *Makara J. Sci.* 16(2): 110–14.
- Karlinasari L, Surjokusumo S, Hadi S H, and Nugroho N. 2005. Non-destructive testing on six tropical woods using ultrasonic method. *Proceeding of the 6th International Wood Science Symposium*; 2005 August 29-31; Bali, Indonesia. Jakarta: JSPS-LIPI Core University Program. hlm 109- 116.
- Lempang M. 2014. Sifat dasar dan potensi kegunaan kayu jabon merah. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*. 3(2): 163–76.
- Oka, GM. 2009. Analisis rasio antara lebar dan tinggi balok terhadap perilaku lentur kayu kamper. *Smartek*. 7(1): 24–31.
- Piao C, Shupe T F, Hse C Y, Tang R C. 2004. Nondestructive evaluation of Young's moduli of full-size wood laminated composite poles. *Proceeding of 7th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, 2004 October 31 - November 2; Nanjing, China. hlm 291–298.
- Hein P R G. 2018. Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of eucalyptus specimens. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(3):333-342.
- Simic K, Gendvilas V, O'Reilly C, Harte A M. 2019. Predicting structural timber grade-determining properties using acoustic and density measurements on young sitka spruce trees and logs. *Holzforschung*. 73(2): 139–49.
- Steiger R, Arnold M, Jockwer R. 2010. Property relationships used in en 338 strength grades of norway spruce structural timber. *Proceeding of 11th World Conference on Timber Engineering*, 2010 June 20-24, Trento, Italy. hlm 1589–1594.
- Syamani F A, Fatriasari W, Budiman I, Hadi Y S. 2012. Sifat fisis-mekanis dan elektrik dari kayu durian (*Durio zibethinus Murr.*) dan kayu kecapi (*Sandoricum koetjape Merr.*) terimpregnasi polistirena. *Proceeding of Masyarakat Peneliti Kayu*

- Indonesia (MAPEKI) XIV*, 2012 November 2; Yogyakarta, Indonesia. hlm 38–45.
- [TC 124] Technical Committee CEN/TC 124. 2003. *EN 338 Structural Timber - Strength Classes*. Brussels: Comite Europeen de Normalisation.
- [TC 124] Technical Committee CEN/TC 124. 2004. *EN 408 Timber Structures: Structural Timber and Glued Laminated Timber - Determination of Some Physical and Mechanical Properties*. Brussels: Comite Europeen de Normalisation.
- Sentagi S U, Mappuji A, Achmad B, Awaludin A, Ayutyastuti, Luckyarno Y F, Yanti R J. 2020. Design of an acoustic-based nondestructive test (NDT) instrument to predict the modulus of elasticity of wood. *Engineering Journal*. 24(6): 109–16.
- Wahyudi, Wospakrik F A, Rettob B B. 2017. Pengujian sifat mekanis kayu lulu (*Celtis latifolia Planc*) pada dua kondisi kadar air asal Manokwari Papua Barat. *JITKT*. 15(1): 68–74.