

Pengujian Non-destruktif Kekuatan Lentur Papan Partikel Wol Semen dari Beberapa Kayu Cepat Tumbuh Menggunakan Metode *Stress Wave Velocity*

(Nondestructive bending strength testing of wood wool cement board from some fast growing species using stress wave velocity method)

Lina Karlinasari¹, Muhammad F Iksan¹, Dede Hermawan¹, Akhiruddin Maddu², Anita Firmanti³

¹Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan IPB

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) IPB

³Puslitbang Pemukiman, Kementerian PU, Cileunyi, Bandung

Corresponding author: lkarlinasari@gmail.com (Lina Karlinasari)

Abstract

The nondestructive testing using stress wave velocity method is known as most important tool to be used in quality control purposes. The aim of this study was to investigate the stress wave velocity (SWV) and to determine correlation between its velocity and dynamic MOE on static bending strength properties (MOE and MOR) of wood wool cement particleboards (WWCB). Thirty six WWCB particleboards from 3 tropical fast growing species (*Paraserianthes falcataria*, *Maesopsis eminii*, and *Acacia mangium*) and three different particleboards density of 0.5, 0.8 and 1.0 g cm⁻³ were made in this study. SWV value was determined using stress wave timer and it used to measure dynamic MOE. The measurement results of static bending strength method (MOEs and MOR) and by stress wave method were compared. The result showed the higher density of CBWW the higher of stress wave velocity. The WWCB particleboard of sengon possessed the highest value for both SWV and MOR. The dynamic MOE measured by stress wave method was about 80% higher than that static test. The good correlations were found between SWV and static MOE, MOR and it was statistically significant for linear regression model developed.

Key words: fast growing species, nondestructive testing, static bending strength, stress wave velocity, wood wool cement particleboard

Pendahuluan

Dalam industri pembuatan panel komposit kayu (*wood-based composite*), beberapa contoh uji diambil untuk dilakukan pengujian secara destruktif untuk keperluan pengendalian kualitas. Pengujian terhadap contoh uji secara destruktif tersebut akan sangat sulit dilakukan pada setiap produksi panel yang dihasilkan. Pengujian nondestruktif akan sangat membantu untuk melakukan

evaluasi terhadap beberapa sifat panel komposit secara cepat dan akurat. Pengujian nondestruktif atau *nondestructive testing/evaluation* (NDT/E) metode gelombang tegangan suara atau *stress wave* telah diketahui sukses untuk menduga sifat panel komposit kayu (Pellerin & Ross 2002, Han *et al.* 2006, Arruda *et al.* 2011). Parameter NDT dalam metode *stress wave* adalah kecepatan rambat gelombang suara (*speed or velocity*

of sound transmission) dan atenuasi (*attenuation*).

Parameter yang umum digunakan dalam metode *stress wave* adalah pengujian waktu rambat gelombang (*time of flight*) untuk menentukan kecepatan rambatan gelombang suara (*stress wave propagation velocity*, SWV). Metode ini merupakan analisa dinamis dimana terdapat hubungan antara SWV dengan sifat mekanis *modulus of elasticity* (MOE).

Frybort *et al.* (2008) menyatakan papan semen komposit (*cement bonded composites*, CBCs) merupakan salah satu produk komposit yang sudah berkembang sangat luas, baik di negara maju maupun negara berkembang. Produk papan semen yang dikembangkan berupa papan wol semen (*cement-bonded wood wool boards*), papan partikel semen (*cement-bonded particleboards*), maupun papan semen dengan penguatan serat (*fibre-reinforced cement boards*). Kelebihan dari papan semen adalah ketahanan terhadap api, rayap, dan air, kemudahan dalam pengerjaan atau pemesinan, bahkan kemudahan dalam pembuatannya, serta memiliki sifat insulasi suara yang baik.

Masalah utama dalam pembuatan papan semen adalah kesesuaian bahan baku kayu dengan perekat semen akibat adanya kandungan zat gula dan lignosufonat yang dapat menghambat waktu pengerasan (*curing setting*). Penelitian papan wol semen dari kayu sengon (*Paraserianthes falcataria*) berkerapatan sekitar $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ telah dilakukan oleh Sulastiningsih *et al.* (1995, 1999), Firmanti dan Subiyanto (1998), Subiyanto dan Firmanti (1998). Sementara itu untuk sifat fisis mekanis papan wol semen dari kayu jenis *Acacia mangium* telah dilakukan oleh Firmanti dan Subiyanto (1998), Subiyanto dan Firmanti (1998), Eusebio *et al.* (2000),

Semple dan Evans (2000). Penelitian-penelitian tersebut di atas menunjukkan perbaikan sifat fisis mekanis papan semen dapat dilakukan melalui perlakuan perendaman partikel kayu sebelum proses pembuatan papan semen.

Penelitian Han *et al.* (2006) menunjukkan pengujian nondestruktif metode *stress wave velocity* (SWV) dapat digunakan untuk menduga nilai sifat mekanis lentur (MOE dan MOR) produk komposit yang terdiri dari kayu lapis, *oriented strand board* (OSB), dan papan partikel dari *southern pine* berperekat sintetis dengan nilai koefisien determinasi model (R^2) lebih dari 0,80.

Penelitian NDT menggunakan metode SWV juga dilakukan oleh Aruda *et al.* (2011) dan Aroujo *et al.* (2011) pada papan partikel bambu jenis *Guadua magna* yang berperekat sintetis dan anorganik (semen dan gipsum). Hasil penelitian tersebut menunjukkan model hubungan untuk memprediksi sifat mekanis lentur (MOE dan MOR) memiliki nilai R^2 sekitar 0,70 untuk variabel penduga berupa MOE dinamis yang diperoleh dari nilai SWV.

Penelitian NDT terhadap kayu dan produk kayu komposit kayu tropis Indonesia masih sangat terbatas. Informasi tentang pengujian nondestruktif sangat bermanfaat untuk menduga sifat kayu terutama sifat kekakuan dan kekuatan secara cepat, sehingga kegiatan pengendalian kualitas produk dapat lebih efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan rambatan gelombang suara (SWV) papan semen dari tiga jenis kayu cepat tumbuh dan hubungan sifat mekanis lentur MOE dan *modulus of rupture* (MOR) dengan SWV untuk menduga nilai sifat mekanis lentur tersebut.

Bahan dan Metode

Bahan yang digunakan adalah papan semen wol dari tiga jenis kayu cepat tumbuh yaitu sengon (*Paraserianthe falcataria*), kayu afrika (*Maesopsis emini*), dan mangium (*Acacia mangium*) dengan 3 (tiga) macam kerapatan target papan (0,5, 0,8, dan 1,0 g cm⁻³). Bahan baku wol kayu diperoleh dari potongan kayu sepanjang 40 cm yang dimasukkan ke dalam mesin pembuat wol. Ukuran partikel wol yang dihasilkan yaitu tebal 0,02–0,05 cm dan lebar 0,3–0,4 mm dengan panjang 10 cm. Semua bahan tersebut selanjutnya dioven pada suhu 70–80 °C selama dua hari untuk mendapatkan kadar air partikel ± 10%. Perikat semen yang digunakan adalah jenis Portland yang diperoleh dari pasaran komersial.

Pembuatan lembaran papan wol menggunakan komposisi partikel kayu: semen sebesar 1:2 dan air:semen adalah 1:2. Lembaran papan yang dibuat berukuran (30x30x1) cm³. Sebelum digunakan partikel wol kayu direndam selama 48 jam dalam air pada kondisi ruangan dengan penggantian air setiap 24 jam. Tujuan dari perendaman adalah melarutkan kandungan gula dan senyawa lignosulfonat yang terkandung dalam kayu serta pembasahan partikel hingga kadar air partikel di atas 50%. Kondisi basah ini memudahkan pencampuran partikel dengan semen. Partikel yang telah disiapkan dicampur/disemprot larutan katalisator MgCl₂ 2,5% (berdasarkan berat semen). Setelah itu partikel dicampur dengan semen dan diaduk sampai merata. Kemudian adonan tersebut ditaburkan ke dalam cetakan (*forming box*), dimana pada kedua permukaannya diberi lembaran

plastik dengan kedua tepinya diberi plat besi dengan ketebalan 1,0 cm. Selanjutnya dilakukan kempa dingin (*cold press*) selama 24 jam pada tekanan sekitar 25 kg cm⁻². Setelah kempa dibuka, papan yang dihasilkan dibiarkan untuk pengkondisian selama 4 minggu untuk kemudian dipotong sesuai ukuran contoh uji pengujian. Ulangan dari masing-masing papan tersebut adalah empat kali.

Contoh uji papan semen yang digunakan berukuran (5x5x20) cm³. Alat *metriguard 239A stress-wave timer* (Gambar 1) digunakan untuk menghitung SWV. Alat *metriguard* di atur sedemikian rupa dalam posisi waktu nol sesuai petunjuk manual alat. Gelombang suara dibangkitkan oleh tumbukan pendulum yang dilepaskan dari ketinggian maksimal pada satu sisi contoh uji, selanjutnya gelombang suara merambat sepanjang contoh uji hingga mencapai *accelelerometer* pada ujung sisi lainnya. Waktu rambatan (mikro detik) terbaca pada layar alat dan digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang suara (SWV). Nilai SWV dan MOE dinamis dihitung berdasarkan persamaan:

$$SWV = \frac{L}{t}$$
$$MOE_d = \frac{SWV^2 \cdot \rho}{g}$$

dimana SWV adalah kecepatan rambatan gelombang suara (*stress wave velocity*) (m detik⁻¹), L adalah panjang contoh uji, t adalah waktu rambatan gelombang (μ detik), MOEd adalah MOE dinamis (kg cm⁻²), ρ adalah kerapatan bahan (g cm⁻³), dan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m det⁻²).



Gambar 1 Pengujian *stress wave velocity* menggunakan Metriguard 239A.

Pengujian lentur statis dilakukan berdasarkan standar JIS A 5417 (1992) untuk papan semen. Pengujian dilakukan menggunakan *universal testing machine* (UTM) Instron tipe 3369 dengan pembebanan terpusat dan jarak sangga 15 kali tebal sampel untuk menentukan MOE statis dan MOR. Analisis regresi linear dilakukan untuk menentukan hubungan antara SWV dan MOE dinamis dengan pengujian statis MOE dan MOR.

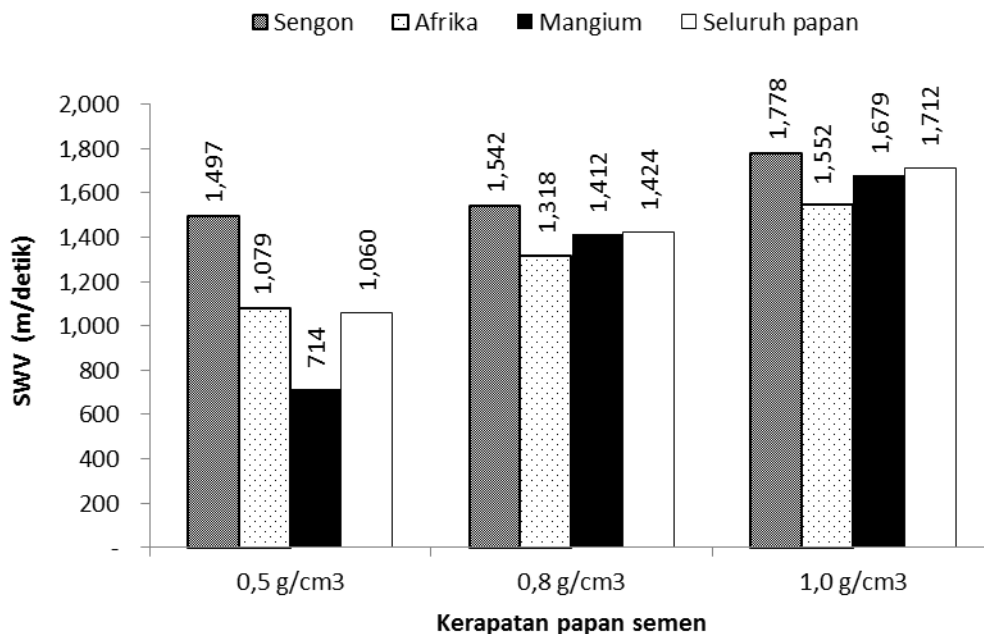
Hasil dan Pembahasan

Kecepatan rambat gelombang suara (SWV)

Berdasarkan Gambar 2 diketahui bahwa nilai SWV papan semen pada kondisi kering udara berkisar antara 700 m det⁻¹ hingga 1700 m detik⁻¹. Nilai rata-rata kecepatan gelombang suara untuk papan semen seluruh jenis kayu (sengon, afrika, dan mangium) adalah 1060 m det⁻¹ untuk kerapatan papan 0,5 g cm⁻³ dan masing-

masing 1424 dan 1712 m det⁻¹ untuk kerapatan papan semen sedang dan tinggi 0,8 dan 1,0 g cm⁻³. Nilai SWV tertinggi adalah pada kayu sengon. Pada papan wol semen jenis kayu tersebut, nilai SWV adalah 1497, 1542, dan 1778 m det⁻¹ untuk masing-masing kerapatan 0,5, 0,8, dan 1,0 g cm⁻³.

Nilai SWV papan semen dari jenis kayu afrika dan mangium yang lebih lambat dibandingkan dengan papan semen kayu sengon diduga erat kaitannya dengan kompatibilitas atau kecocokan bahan baku jenis kayu tersebut dengan perekat semen yang kurang baik. Penelitian Firmanti dan Subiyanto (1998) serta Subiyanto dan Firmanti (1998) melaporkan bahwa kayu mangium kurang cocok bereaksi dengan semen dibanding kayu sengon. Penelitian Karlinasari *et al.* (2010) menunjukkan nilai suhu hidrasi semen-partikel sengon adalah yang tertinggi, diikuti kayu afrika dan mangium.



Gambar 2 Kecepatan rambat gelombang suara papan semen pada berbagai kerapatan.

Dari pengujian dengan jenis dan tipe alat yang sama, papan partikel bambu berperekat inorganik (semen dan gipsum) dengan kerapatan sekitar $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ memiliki nilai SWV sekitar 1890 m det^{-1} . Untuk produk komersial papan partikel kayu *southern pine* rata-rata berkerapatan $0,78 \text{ g cm}^{-3}$ sebesar 1800 m det^{-1} , sementara itu untuk produk *oriented stand board* (OSB) dari campuran *hardwood* dengan rata-rata kerapatan papan $0,67 \text{ g cm}^{-3}$ adalah 2700 m det^{-1} . Untuk kayu lapis dan kayu solid dari jenis *southern pine* dengan rata-rata kerapatan $0,57 \text{ g cm}^{-3}$ nilai SWV yang diperoleh adalah masing-masing 4000 m det^{-1} (Han *et al.* 2006). Penelitian Arruda *et al.* (2011) pada papan partikel bambu dan campuran bambu-kayu berperekat sintesis urea dan fenol formaldehida dengan kerapatan rata-rata $0,65 \text{ g cm}^{-3}$ menghasilkan nilai SWV sekitar 1960 m det^{-1} .

Nilai SWV kayu solid sejajar serat pada kondisi kering udara (kadar air 9-15%) adalah berkisar $3000\text{-}6000 \text{ m det}^{-1}$ (Gerhards 1982). Penelitian Paradipto (2005) menghasilkan nilai kecepatan rambatan gelombang suara (SWV) kayu contoh kecil bebas cacat jenis kayu mangium dengan kerapatan $0,58 \text{ g cm}^{-3}$ adalah rata-rata sebesar 4040 m det^{-1} .

Semakin tinggi kerapatan produk kayu, nilai SWV semakin tinggi. Nilai SWV papan semen lebih lambat dibandingkan kayu solid dan papan komposit partikel berperekat pada kerapatan yang sama. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya rongga pada produk kayu yang dapat memperlambat kecepatan gelombang suara (Pellerin & Ross 2002, Bucur 2006). Pada kasus papan semen, rongga yang terbentuk pada produk komposit diduga lebih besar dibandingkan rongga pada produk panel komposit berperekat sintesis apalagi pada kayu solid. Peningkatan

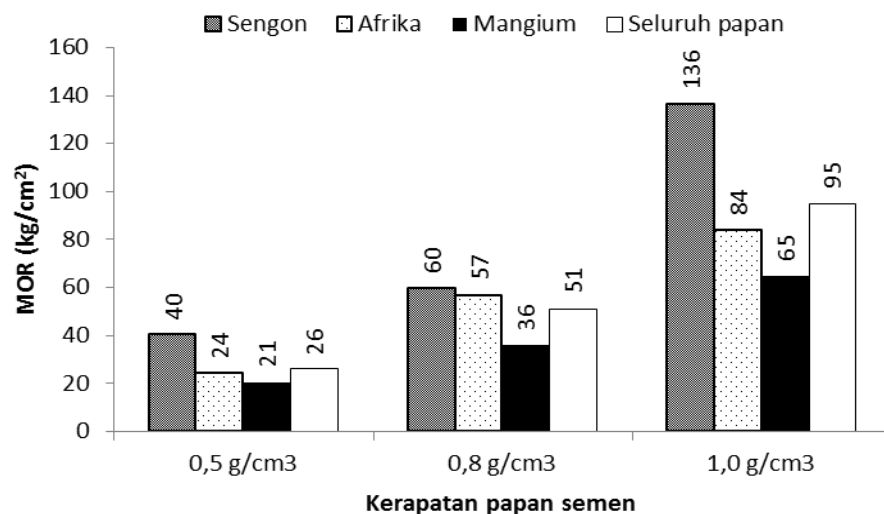
kerapatan papan menghasilkan kekompakan produk yang semakin tinggi. Semakin kompak suatu panel maka rongga yang terbentuk lebih sedikit sehingga media rambatan gelombang suara semakin baik akibatnya rambatan gelombang suara akan semakin cepat.

Lentur statis MOR dan MOE hubungan dengan SWV

Hasil pengujian lentur MOE dan MOR papan semen kayu cepat tumbuh pada berbagai kerapatan papan disajikan pada Gambar 3 dan 4. Berdasarkan Gambar 3 diketahui pada nilai keteguhan lentur, MOR, semakin tinggi kerapatan semakin tinggi kuat lentur papan semen tersebut. Hal ini karena semakin tinggi kerapatan suatu bahan maka kekompakan masa bahan pengisi papan komposit semakin tinggi sehingga kekuatan lenturnya akan semakin tinggi. Papan semen dari kayu sengon memiliki nilai MOR tertinggi mencapai 136 kg cm^{-2} , diikuti papan wol semen kayu afrika dan sengon dengan nilai masing-masing 84 dan 65 kg cm^{-2} untuk kerapatan $1,0 \text{ g cm}^{-3}$. Untuk papan wol semen kerapatan tinggi tersebut, seluruh papan wol kayu cepat tumbuh yang diuji memenuhi persyaratan standar

JIS A 5417-1992 untuk papan semen yang mensyaratkan nilai minimal MOR 63 kg cm^{-2} . Sementara itu, mengacu pada standar ISO 8335 pada Sulastiningsih *et al.* (1999) yang mensyaratkan nilai MOR antara $90-150 \text{ kg cm}^{-2}$ untuk papan semen tidak kurang dari kerapatan $1,0 \text{ g cm}^{-2}$, maka hanya papan wol semen kayu sengon yang memenuhi standar tersebut. Seperti disampaikan sebelumnya maka hal ini berkaitan erat dengan kesesuaian bahan baku kayu sengon dengan bahan pengikat semen dibandingkan dengan kayu jenis lain yang ditunjukkan dengan nilai maksimal suhu hidrasinya pada waktu tertentu.

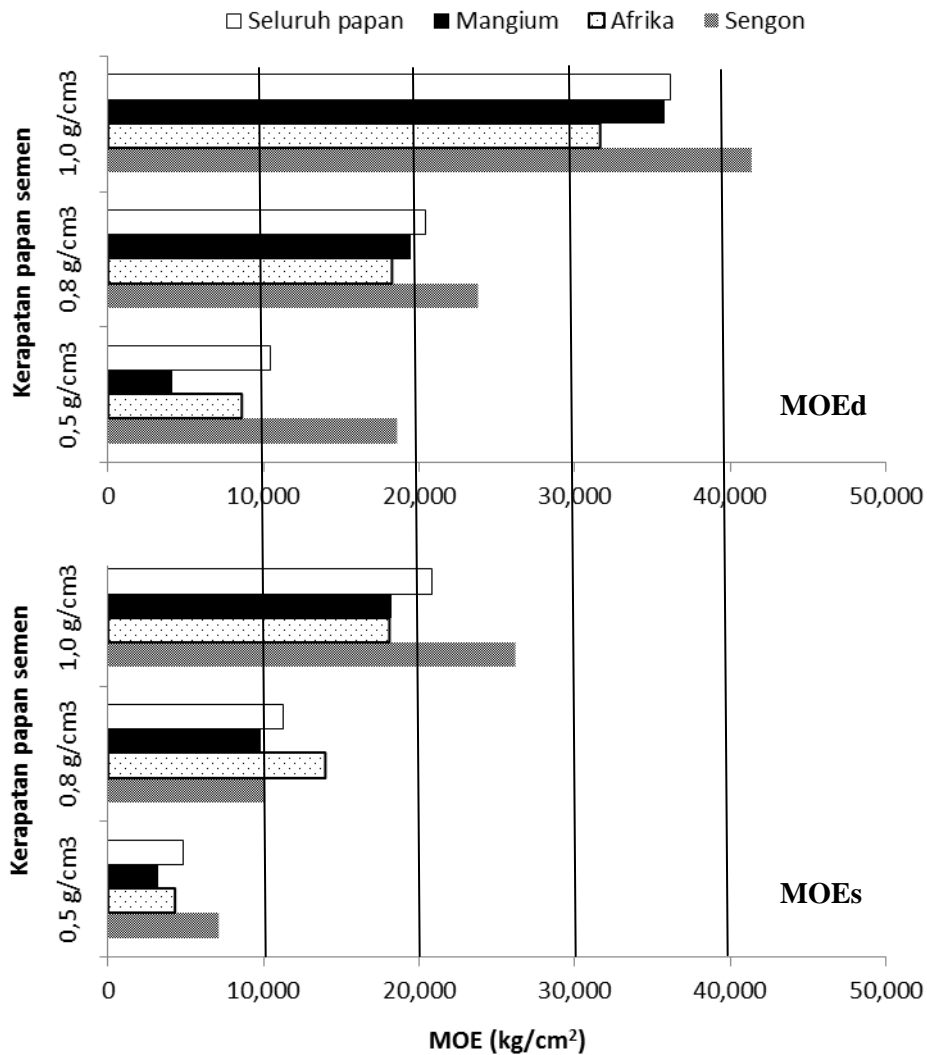
Nilai rata-rata pengujian lentur statis MOE (MOEs) untuk seluruh papan pada kerapatan $0,5 \text{ g cm}^{-3}$ nilai MOE statis adalah 5.004 kg cm^{-2} , kerapatan $0,8 \text{ g cm}^{-2}$ sebesar $11.246 \text{ kg cm}^{-2}$, dan nilai MOE statis pada kerapatan papan $1,0 \text{ g cm}^{-2}$ adalah $20.820 \text{ kg cm}^{-2}$. Semakin tinggi kerapatan papan maka nilai MOE semakin tinggi (Gambar 4). Nilai rata-rata kekakuan lentur dinamis (MOEd) papan semen yang diperoleh dari perhitungan nilai SWV adalah sebesar 10.121 , 20.459 dan $36.202 \text{ kg cm}^{-2}$ masing-masing untuk kerapatan $0,5$, $0,8$, dan $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.



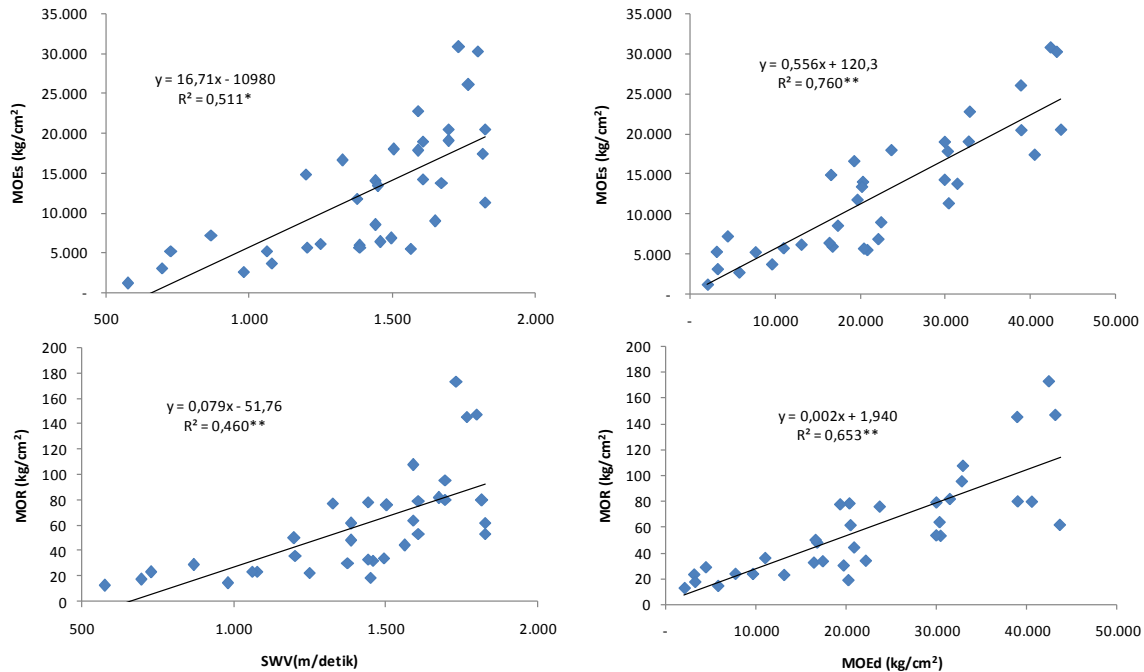
Gambar 3 MOR papan semen 3 jenis kayu cepat tumbuh.

Nilai tersebut lebih tinggi masing-masing 86,9, 81,9, dan 73,9% terhadap nilai MOE statis-nya. Dari penelitian sebelumnya menggunakan metode *stress wave* (Wang *et al.* 2001, Han *et al.* 2006, Arruda *et al.* 2011, Araujo *et al.* 2011) diketahui bahwa pengujian nondestruktif akan menghasilkan nilai dugaan yang lebih tinggi dibandingkan uji destruktif statisnya yang disebabkan oleh perilaku viskoelastis

bahan kayu. Walaupun demikian, pengujian secara nondestruktif efektif digunakan untuk menduga sifat lentur statis kayu melalui model hubungan yang dibangun dari variabel pengujian nondestruktif (Pellerin & Ross 2002). Model regresi hubungan hasil pengujian nondestruktif SWV dan MOEd dengan hasil pengujian lentur statis MOEs dan MOR disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4 MOE statis (MOEs) dan dinamis (MOEd) papan semen 3 jenis kayu cepat tumbuh.

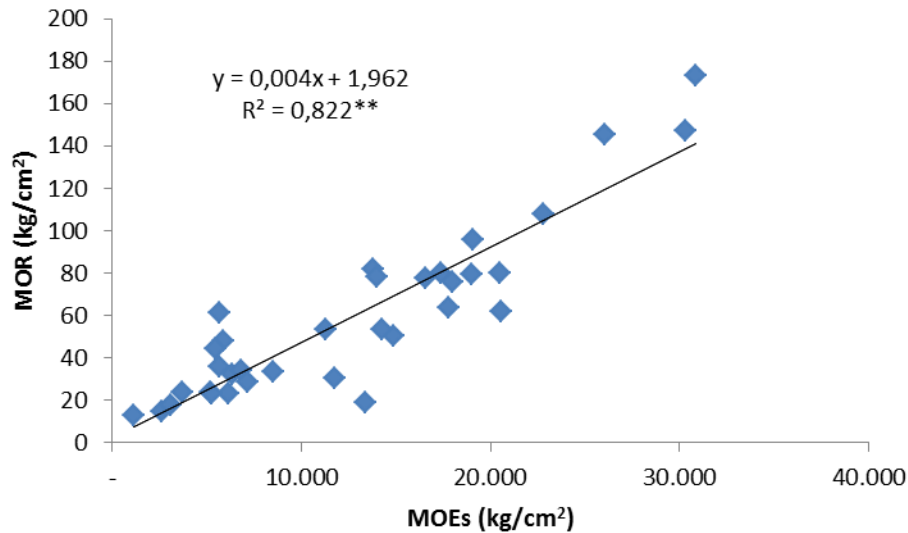


Gambar 5 Hubungan sifat mekanis lentur statis (MOEs dan MOR) dengan SWV dan MOE dinamis (MOEd).

Analisis regresi linear sederhana menghasilkan hubungan antara nilai SWV dengan MOE statis dan MOR yang erat seperti ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) masing-masing 0,51 dan 0,46 dan koefisien korelasi (r) 0,71 untuk SWV dengan MOEs dan 0,68 untuk SWV dengan MOR. Kedua analisis regresi tersebut menghasilkan model pendugaan yang nyata. Hal ini berarti bahwa model yang dihasilkan dapat digunakan untuk menduga baik untuk nilai MOE statis maupun MOR berdasarkan nilai SWV-nya. Nilai SWV sesungguhnya merefleksikan kondisi internal bahan dimana gelombang yang merambat juga sensitif terhadap karakteristik ikatan (*bonding characteristics*) yang terjadi

pada produk panel komposit. Hubungan yang lebih kuat ditunjukkan oleh MOEd dengan MOEs dan MOR. Nilai R^2 untuk masing-masing hubungan tersebut adalah 0,76 dan 0,65 serta nilai r yang diperoleh adalah 0,87 dan 0,81 dengan model regresi linear sederhana yang nyata.

Hubungan antara pengujian lentur statis MOE (MOEs) dan MOR disajikan pada Gambar 6. Analisis regresi linear yang dilakukan menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) dan koefisien korelasi (r) masing-masing 0,82 dan 0,90. Sesuai dengan teori terdapat hubungan yang erat antara nilai MOE dan MOR (Bodig & Jayne 1982), karenanya nilai MOE dapat digunakan untuk menduga nilai MOR kayu atau produk kayu.



Gambar 6 Hubungan lentur statis MOE dengan MOR.

Kesimpulan

Semakin tinggi kerapatan papan semen maka kecepatan rambatan gelombang suara (*stress wave velocity*/SWV) akan semakin tinggi/cepat. Nilai SWV papan wol semen kayu sengon lebih cepat dibandingkan papan semen kayu afrika dan mangium, begitu pula dengan nilai MOR-nya. Hal ini berkaitan dengan kompatibilitas kayu sengon dengan perekat semen. Pengujian nondestruktif metode SWV dapat menduga dengan baik nilai sifat mekanis lentur statis MOE dan MOR papan semen

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini adalah bagian dari penelitian Hibah Kompetensi melalui dana dari Direktorat Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional RI untuk tahun anggaran 2010-2011.

Daftar Pustaka

Arruda LM, Del Menezzi CHS, Teixeira DE, de Araujo PC. 2011. Lignocellulosic composites from

brazilian giant bamboo (*Guadua magna*) Part 1: Properties of resin bonded particleboards. *Mederas. Clencia y Technol.* 13(1):49-58.

Bodig J, Jayne BA. 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Florida: Krieger Publishing Company Malabar.

Bucur V. 2006. *Acoustic of Wood*. 2nd Berlin: Springer-Verlag

Eusebio DA, Soriano FP, Cabangon RJ, Evans PD. 2000. Manufacture of low-cost wood-cement composites in the Philippines using plantation-grown Australian species: II. Acacia. In: *Proceedings Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region*. Canberra, Australia, 10 Desember 2000. Hlm:115-121.

Firmanti A, Subiyanto B. 1998. Effect of high temperature to the compressive strength of cement-wood composite of some tropical fast growing species. Dalam: *Proceedings the 4th Pacific Rim Bio-Based Composites*

- Symposium*. Bogor, Indonesia, 2-5 November 1998. Pp:466-451.
- Frybort S, Maischinger R, Muller U. 2008. Cement bonded composites-a mechanical review. *Bio Resources* 3(2): 602-206. http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_03/BioRes_03_2_0602_Frybort_MTM_Cement_bonded_composites_Review.pdf (10 Februari 2012)
- Gerhards CC. 1982. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: Factors affecting application: State of the art. *For. Prod. J.* 32(2):20-25.
- Han G, Wu Q, Wang X. 2006. Stress-wave velocity of wood-based panels: Effect of moisture, product type, and material direction. *For. Prod. J.* 56(1):28-33.
- Karlinasari L, Hermawan D, Maddu A, Martianto B. 2010. Pengembangan panel akustik ramah lingkungan dari tanaman kayu cepat tumbuh dan bambu. Laporan Penelitian Hibah Kompetensi. Bogor: Institut Pertanian Bogor (IPB).
- Paradipto S. 2005. Pengujian keteguhan lentur kayu mangium (*Acacia mangium*) dengan berbagai metode nondestruktif pada contoh kecil bebas cacat dan ukuran pemakaian. [skripsi]. Bogor: Departemen Hasil Hutan. Fakultas Kehutanan IPB.
- Pellerin RF, Ross RJ. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison: Forest Products Society.
- Semple KE, Evans PD. 2000. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. In: *Proceeding Wood-Cement Composites in the Asia-Pacific Region*. Canberra, Australia, 10 Desember 2000. Pp: 29-39.
- Subiyanto B, Firmanti A. 1998. Production technology of cement bonded particleboard from tropical fast growing species I. The effect of cement after pre-treatment of particles on cement bonded particleboard properties. Dalam: *Proceedings the 4th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*. Bogor, Indonesia, 2-5 November 1998. Pp:422-427.
- Sulastiningsih IM, Santoso A, Sutigno P. 1995. Sifat papan wol kayu dari sengon dan kayu karet pada beberapa macam umur. *J. Penelitian Hasil Hutan* 13(3):101-109.
- Sulastiningsih IM, Sutigno P, Priyadi YH. 1999. The properties of cement-bonded boards from sengon wood. *Bul. Penelitian Hasil Hutan* 16(5):279-280.
- Wang X, Ross RJ, McClellan M, Barbour RJ, Erickson JR, Forsman JW, McGinnis GD. 2001. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood Fiber Sci.* 33(4):522-533.
- Riwayat naskah (*article history*)
 Naskah masuk (*received*): 28 April 2011
 Diterima (*accepted*): 29 Juni 2011