

Peningkatan Kayu Pulai (*Alstonia scholaris*) dengan Metode Densifikasi Waktu Pengukusan

(Improvement of Pulai Wood (*Alstonia scholaris*) by Steaming Time Densification Method)

Riana Anggraini^{1*}, Marwoto¹, Jauhar Khabibi¹, Beni Zaini²

¹Program Studi Kehutanan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Jambi

²Sinar Mas Forestry, Indonesia

*Coressponding author: nanuk_onra@yahoo.co.id

ABSTRACT

Wood densification is a wood compaction process that aims to increase the density and strength of wood. The application of the densification method to low-quality wood is expected to provide added value to the wood so that it is used by the community. For example, in the type of pulai wood which is included in the IV–V strong class with an average specific gravity of 0.38 g/cm³. Wood densification is affected by wood plasticity, wood plasticization can be done with a softening technique before the wood is processed through pre-treatment such as steaming. The purpose of this study is to analyze the effect of steaming time on the physical and mechanical properties of densified pulai wood (*A. scholaris*). This study used a Complete Random Design of one factor of steaming time treatment with 5 levels of experiments, namely no treatment/control, steaming time of 30 minutes, 45 minutes, 60 minutes and 75 minutes. Physical and mechanical properties testing is carried out on test samples that have been densified. Physical property testing including moisture content and density refers to the standards JIS Z 2102 (1957) and JIS Z 2103 (1957). The mechanical properties tested are MOR and MOE referring to the JIS Z 2113 (1963) standard. The results showed that the steaming time had an effect on the value of moisture content, density, modulus of elasticity and modulus of rupture. The steaming 30-minute, 45-minute and 60-minute times provide results that are not noticeably different, but are markedly different from the 75-minute and control steaming times (without steaming).

Keywords: densification, pulai wood, steaming

ABSTRAK

Densifikasi kayu merupakan suatu proses pemadatan kayu yang bertujuan untuk meningkatkan kerapatan dan kekuatan kayu. Penerapan metode densifikasi terhadap kayu-kayu berkualitas rendah diharapkan dapat memberikan nilai tambah pada kayu tersebut sehingga ragam penggunaannya oleh masyarakat. Misalnya pada jenis kayu pulai yang termasuk dalam kelas kuat IV–V dengan berat jenis rata-rata 0,38 g/cm³. Densifikasi kayu dipengaruhi oleh plastisitas kayu, plastisasi kayu dapat dilakukan dengan teknik pelunakan sebelum kayu dikempa melalui perlakuan pendahuluan (pre-treatment) seperti pengukusan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh waktu pengukusan terhadap sifat fisis dan mekanis kayu pulai (*A. scholaris*) yang didensifikasi. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap satu faktor perlakuan waktu pengukusan dengan 5 taraf percobaan yaitu tanpa perlakuan/kontrol, waktu pengukusan 30 menit, 45 menit, 60 menit dan 75 menit. Pengujian sifat fisis dan mekanis dilakukan

terhadap contoh uji yang telah didensifikasi. Pengujian sifat fisis meliputi kadar air dan kerapatan mengacu pada standar JIS Z 2102 (1957) dan JIS Z 2103 (1957). Sifat mekanis yang diuji adalah MOR dan MOE mengacu pada standar JIS Z 2113 (1963). Hasil penelitian menunjukkan waktu pengukusan memberikan pengaruh pada nilai kadar air, kerapatan, modulus of elasticity dan modulus of rupture. Waktu pengukusan 30, 45 dan 60 menit memberikan hasil yang tidak berbeda nyata, namun berbeda nyata dengan waktu pengukusan 75 menit dan kontrol (tanpa pengukusan).

Kata kunci: densifikasi, pengukusan, kayu pulai

Diterima, 21 November 2024

Disetujui, 23 Desember 2024

Online, 27 Desember 2024

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Salah satu perlakuan yang telah diterapkan dalam rangka meningkatkan kualitas dan sifat-sifat kayu adalah dengan densifikasi (*densification*), baik secara impregnasi (*impregnation*) maupun pengempaan (*compression*) karena keduanya dapat memodifikasi sifat kayu sesuai dengan yang diinginkan (Niklas and Spatz, 2010; Jungstedt *et al.*, 2020; Thomas *et al.*, 2004; Skyba *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2016). Densifikasi kayu merupakan suatu proses pemadatan kayu yang bertujuan untuk meningkatkan kerapatan dan kekuatan kayu. Prinsip kerja metode ini adalah dengan memodifikasi kondisi pemadatan kayu sehingga terjadi deformasi/perubahan bentuk yang akan menghasilkan dimensi kayu yang tetap (fiksasi) dan peningkatan sifat-sifat kayu (Sulistiyono, 2001; Schwarzkopf, 2021; Wehsener *et al.*, 2023; Fang *et al.*, 2012; Gong *et al.*, 2010; Kutnar *et al.*, 2009; Laine *et al.*, 2013; Sadatnezhad *et al.*, 2017).

Menurut Bodig dan Jayne (1993) pemadatan atau densifikasi dilakukan melalui pengempaan kayu dengan suhu dan tekanan tertentu, terutama untuk meningkatkan berat jenisnya. Pemadatan kayu solid ditujukan untuk meningkatkan sifat-sifat kayu baik sifat fisis maupun mekanisnya. Urutan perlakuan pendahuluan dari yang terbaik adalah pengukusan dan perebusan. Akibat pemadatan kayu, struktur mikroskopis kayu (rongga sel dan dinding sel) menjadi lebih pipih dan padat, sehingga meningkatkan kekuatan lebih dari 100% dan stabilitas dimensi (Scharfet *et al.*, 2022; Navi and Girardet, 2000; Neyses *et al.*, 2020). Manfaat produk pemadatan kayu digunakan untuk lantai, *furniture*, bahan interior dan bahan komposit keteknikan (Dwianto, 1999; Rautkari *et al.*, 2013).

Penerapan metode densifikasi terhadap kayu-kayu berkualitas rendah diharapkan dapat memberikan nilai tambah pada kayu tersebut sehingga ragam penggunaannya oleh masyarakat. Misalnya pada jenis kayu pulai yang termasuk dalam kelas awet V dan kelas kuat IV–V dengan berat jenis rata-rata 0,38 g/cm³ (0,27–0,49 g/cm³) Martawijaya *et al.* (2005). Bahan baku mebel persyaratan kayu menurut SNI 01-060-81989 harus

memiliki berat jenis yang berkisar 0,40 dan 0,60 (BSN 1989 dalam Basri *et al.*, 2012). Pengolahan bahan baku mebel harus bersifat mudah dikerjakan, nilai dekoratif yang tinggi dan mempunyai kualitas mutu kayu yang baik. Kayu pulai merupakan jenis kayu yang mudah dikerjakan dan dikeringkan serta mempunyai daya kembang susut yang sedang (Arianana dan Diba, 2009; Pizzi *et al.*, 2005.). Penelitian mengenai densifikasi kayu pulai (*A. scholaris*) dengan menggunakan suhu dan waktu kempa yang tepat dari segi sifat fisis dan mekanis.

Densifikasi kayu dipengaruhi oleh plastisitas kayu, sehingga proses plastisisasi yang sesuai akan menghasilkan produk densifikasi yang berkualitas baik. Plastisisasi merupakan perubahan karakteristik kayu sehingga menjadi lebih lunak dan lebih mudah untuk dibentuk (dipadatkan atau dilengkungan) dengan energi yang lebih rendah serta tingkat kerusakan yang relatif kecil (Sulistiyono, 2001). Proses plastisisasi kayu dapat dilakukan dengan teknik pelunakan sebelum kayu dikempa melalui perlakuan pendahuluan (*pre-treatment*) seperti pengukusan. Penelitian Nurrachmania (2019) pra-perlakuan pengukusan pada pemadatan kayu jabon berhasil meningkatkan kerapatan kayu tersebut. Peningkatan kerapatan tertinggi sebesar 86,5% terjadi pada pra-perlakuan pengukusan 60 menit ($0,37 \text{ g/cm}^3 \rightarrow 0,69 \text{ g/cm}^3$). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai peningkatan mutu kualitas kayu pulai (*A. scholaris*) yang didensifikasi dengan perlakuan waktu pengukusan. Adapun tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh waktu pengukusan terhadap sifat fisis dan mekanis kayu pulai (*A. scholaris*) yang di densifikasi.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Pertanian, Universitas Jambi, Laboratorium Kimia Hasil Hutan dan Laboratorium Peningkatan Mutu Kayu Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah pohon pulai (*A. scholaris*) berasal dari Desa Mendis Kecamatan Bayung Lencir, Sumatera Selatan. Pohon pulai berumur ± 16 tahun, memiliki tinggi total ± 17 m, tinggi bebas cabang 15 cm dan diameter pohon 36 cm. Bahan lain yang digunakan adalah air untuk pengukusan, kertas kalkir untuk menghaluskan bahan baku, *aluminium foil* untuk membungkus bahan baku agar tetap konstan kadar airnya dan alat tulis. Alat yang digunakan adalah *speedy autoklaf* (untuk mengukus), mesin kempa panas *merk Weili* (untuk densifikasi kayu pulai), timbangan digital, kaliper (untuk mengukur dimensi contoh uji), *moisture meter* (untuk

mengukur kadar air), oven (untuk mengeringkan contoh uji), desikator, *Universal Testing Machine* merk Instron® tipe 3369 untuk pengujian sifat mekanis.

Persiapan Bahan Baku

Penebangan pohon pulai (*A. scholaris*) dilakukan setinggi 30 cm diatas tunggak dan dipotong sampai batas bebas cabang. Kemudian dilakukan pemotongan batang dengan mengambil bagian pangkal sepanjang 5 meter, kemudian dilapisi dengan *aluminium foil* pada bagian penampang melintangnya untuk mencegah penguapan air yang berlebihan dan serangan jamur. Selanjutnya kayu pulai tersebut dibuat sampel dan dikeringanginkan hingga mencapai kadar air 12–18% dengan waktu selama 2 minggu. Setelah tercapai kondisi kadar air kering udara yang diinginkan, papan dipotong dengan ukuran p₁x_lx_t (50 cm x 2 cm x 2,5 cm) sebanyak 15 buah sesuai dengan perlakuan kemudian dilakukan pengukuran dimensinya.

Perlakuan Waktu Pengukusan

Contoh uji yang berjumlah 15 sampel diberi perlakuan pengukusan. Pengukusan dilakukan dengan *autoklaf* menggunakan air pada suhu 120 °C dengan variasi lama waktu pengukusan kontrol (tanpa pengukusan), 30 menit, 45 menit, 60 menit dan 75 menit.

Densifikasi Kayu

Sampel yang telah dikukus, didinginkan selama 5-10 menit, selanjutnya sampel kayu dilapisi dengan *aluminium foil* untuk menghindari terjadinya gosong pada saat pengempaan. Sampel kayu dikempa pada suhu 150 °C dengan beban sebesar 10,151 Mpa dan lama waktu densifikasi 4-5 menit. Sampel yang telah dikempa didiamkan selama 15 menit, selanjutnya sampel dikeringudarkan selama 7 hari.

Pengujian Sifat Fisis dan Mekanis

Pengujian sifat fisis dan mekanis dilakukan terhadap contoh uji yang telah didensifikasi. Pengujian sifat fisis meliputi kadar air dan kerapatan mengacu pada standar JIS Z 2102 (1957) dan JIS Z 2103 (1957). Sifat mekanis yang diuji adalah MOR dan MOE mengacu pada standar JIS Z 2113 (1963).

Analisis Data

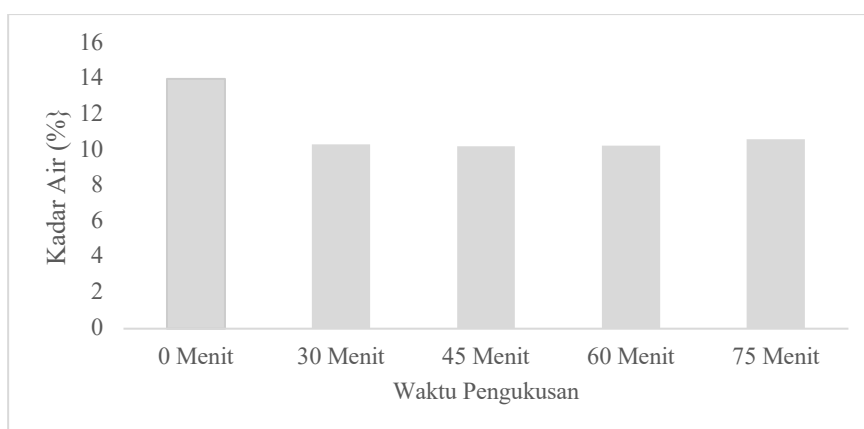
Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap satu faktor perlakuan waktu pengukusan dengan 5 taraf percobaan yaitu tanpa perlakuan/kontrol, waktu pengukusan 30 menit, 45 menit, 60 menit dan 75 menit dengan 3 kali ulangan. Analisis data menggunakan sidik ragam selang kepercayaan 95%. Hasil sidik ragam dilakukan uji

Duncan Multiple Range Test (DMRT) untuk melihat yang berbeda nyata bagi percobaan yang berpengaruh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Air

Nilai rata-rata kadar air kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berkisar antara 10,23% - 14,01%. Nilai rata-rata kadar air terendah pada waktu pengukusan 45 menit. Nilai rata-rata kadar air kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi disajikan pada Gambar 1. Hasil penelitian menunjukkan kadar air kayu pulai yang didensifikasi lebih rendah dibandingkan kayu pulai tanpa didensifikasi, hal ini disebabkan karena terjadi pemadatan pada rongga sel kayu sehingga jumlah air dalam kayu berkurang. Diprediksi bahwa struktur dan susunan sel serat kayu akan semakin padat selama proses densifikasi kayu (Basri *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2022).

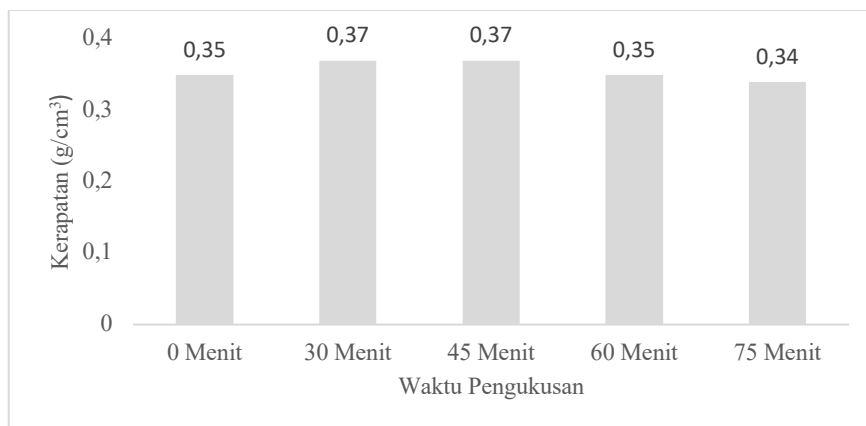


Gambar 1. Nilai rata-rata kadar air kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi dengan perlakuan waktu pengukusan

Hasil sidik ragam menunjukkan waktu pengukusan memberikan pengaruh nyata terhadap nilai kadar air kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi (Huang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). Hasil *Duncan* menunjukkan waktu pengukusan 75 menit tidak memberikan perbedaan dengan waktu pengukusan 60 menit dan berbeda dengan waktu pengukusan 30 menit, 45 menit dan tanpa pengukusan. Perlakuan pemadatan dengan kempa panas pada kayu jabon dengan proses pengukusan dapat menurunkan kadar air setimbang 15,8% menjadi 10,6% (Basri *et al.*, 2014). Nilai kadar air kayu pulai berkisar antara 6,91-9,04% mengalami penurunan jika dibandingkan dengan nilai kadar air kayu pulai kontrol yaitu sebesar 15,29% (Arinana dan Diba, 2009). Perlakuan pengukusan dapat menurunkan kadar air kayu karena adanya panas yang diberikan pada kayu yang menyebabkan bahwa panas akan mendesak uap air keluar dari dalam kayu (Amin dan Dwianto, 2006).

Kerapatan

Nilai rata-rata kerapatan kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berkisar antara $0,34 \text{ g/cm}^3$ - $0,37 \text{ g/cm}^3$. Nilai rata-rata kerapatan tertinggi dengan waktu pengukusan 30 dan 45 menit. Nilai rata-rata kerapatan kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi disajikan pada Gambar 2.

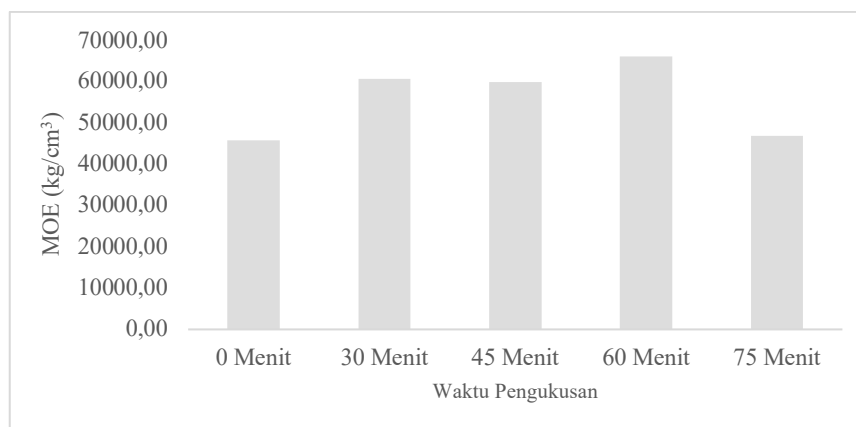


Gambar 2. Nilai rata-rata kerapatan kayu pulai (*Alstonia scholaris*) densifikasi dengan perlakuan waktu pengukusan

Hasil sidik ragam menunjukkan waktu pengukusan berpengaruh nyata terhadap nilai kerapatan kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi. Hasil *Duncan* menunjukkan waktu pengukusan 75, 60, 45 dan 30 tidak terdapat perbedaan, hanya berbeda dengan kayu pulai tanpa pengukusan. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kerapatan kayu pulai dengan perlakuan pengukusan sebelum dilakukan densifikasi. Kayu akan menjadi lebih lunak setelah proses pengukusan, sehingga proses densifikasi lebih efektif (Diawanich *et al.*, 2010). Hartono *et al.* (2023) menunjukkan nilai kerapatan kayu jabon tertinggi pada waktu densifikasi selama 10 menit. Nilai kerapatan kayu pulai kontrol adalah $0,40 \text{ g/cm}^3$, setelah didensifikasi mengalami peningkatan $0,49 \text{ g/cm}^3$ - $0,53 \text{ g/cm}^3$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa densifikasi kayu dapat meningkatkan nilai kerapatan kayu. Peningkatan nilai ini diakibatkan karena berkurangnya volume kayu akibat didensifikasi hingga mencapai 30%, sedang massa kayu tidak banyak berkurang.

Modulus of Elasticity (MOE)

Nilai rata-rata MOE kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berkisar antara $45880,00 \text{ kg/cm}^2$ - $66317,81 \text{ kg/cm}^2$. Nilai rata-rata MOE tertinggi dengan pengukusan 60 menit, terendah tanpa pengukusan. Hal ini menunjukkan ada mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan nilai MOE kayu pulai tanpa pengukusan. Nilai rata-rata MOE kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Nilai rata-rata MOE kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berdasarkan waktu pengukusan

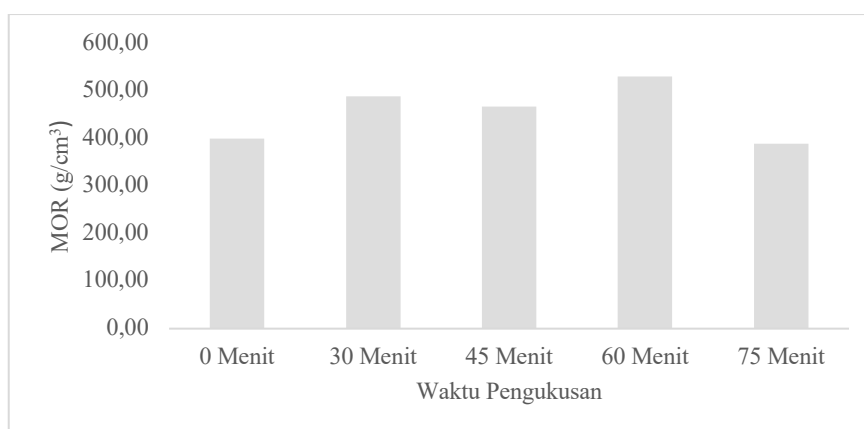
Hasil sidik ragam menunjukkan waktu pengukusan berpengaruh nyata terhadap nilai MOE kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi. Hasil *Duncan* menunjukkan waktu pengukusan 60, 45, 30 menit tidak berbeda nyata, hanya berbeda dengan kayu pulai tanpa pengukusan dan waktu pengukusan 75 menit. Berdasarkan nilai rata-rata MOE pada Gambar 3, menjelaskan bahwa perlakuan pengukusan menggunakan *autoklaf* dan metode densifikasi mampu meningkatkan kekuatan lentur statis kayu pulai tanpa pengukusan dengan waktu pengukusan 30 menit, 45 menit dan 60 menit, namun pada kayu pulai dengan pengukusan 75 menit terjadi penurunan nilai MOE. Hal ini terjadi karena lama waktu pada saat densifikasi dan suhu yang terlalu tinggi mengakibatkan struktur sel anatomi kayu di dinding sel mengalami deformasi. Penurunan nilai MOE pada kayu pulai terjadi karena pada bagian kayu yang struktur selnya rusak tersebut tidak terjadi kesatuan gaya reaksi yang bekerja untuk melawan gaya luar.

Penelitian Hartono *et al.* (2023) nilai rata-rata modulus elastisitas (MOE) kontrol kayu jabon adalah 31.403 kg/cm². Setelah proses densifikasi, berkisar antara 45.879-61.411 kg/cm². Hasil penelitiannya, menunjukkan densifikasi 10 menit adalah yang terbaik untuk meningkatkan nilai MOE kayu jabon. Ini karena saat kayu menjadi densifikasi, lumen menyempit dan dinding sel menjadi lebih ketat satu sama lain karena suhu dan waktu densifikasi. Nilai MOE rata-rata, dengan perlakuan densifikasi waktu 10 menit memiliki nilai MOE yang lebih baik daripada perlakuan lain dan nilai kontrol. Ini terjadi sebagai akibat dari peningkatan kerapatan kayu. Menurut Pinna *et al.* (2016) kerapatan atau berat jenis kayu merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi sifat mekanik kayu.

Modulus of Rupture (MOR)

Nilai rata-rata MOR kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berkisar antara 399,22 kg/cm² – 530,02 kg/cm². Nilai rata-rata MOR tertinggi dengan pengukusan 60 menit, terendah dengan pengukusan 75 menit. Perlakuan pengukusan memberikan kenaikan

nilai MOR dibandingkan dengan kayu tanpa pengukusan, hal ini terjadi karena pra-perlakuan pengukusan menyebabkan kayu cenderung lebih lunak sehingga lebih mudah terdeformasi (dipadatkan) dan mencapai target ketebalan yang diharapkan. Proses plastisasi dengan cara pemberian panas pada kayu agathis dapat dicapai pada suhu diatas 120 °C. Kayu jabon, karena merupakan kayu berkerapatan rendah maka pra-perlakuan pengukusan diatas air mendidih (suhu ± 90-100 °C) diduga cukup untuk menyebabkan kayu menjadi lunak (plastis), sehingga mempermudah proses pengempaan (Sulistiyono, 2001; Guo *et al.*, 2022; Jakob *et al.*, 2020). Hasil sidik ragam menunjukkan waktu pengukusan berpengaruh nyata terhadap nilai MOR. Hasil Duncan menunjukkan waktu pengukusan 30, 45 dan 60 menit tidak berbeda nyata dan berbeda nyata dengan kontrol dan waktu pengukusan 75 menit.



Gambar 4. Nilai rata-rata MOR kayu pulai (*A. scholaris*) densifikasi berdasarkan waktu pengukusan

Berdasarkan nilai MOR diatas, bahwa tidak semua kayu pulai yang didensifikasi mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan kayu pulai tanpa perlakuan pengukusan (kontrol). Kayu pulai yang tidak mencapai kenaikan nilai MOR dengan waktu pengukusan 75 menit. Hal ini diduga telah terjadi kerusakan pada struktur anatomi kayu pulai setelah didensifikasi, akibat adanya lama waktu pepadatan dan suhu yang terlalu tinggi sehingga menurunkan nilai MOR. Menurut Wardhani (2006) menjelaskan bahwa kerusakan struktur anatomi kayu pada dinding sel akan menurunkan kekuatan kayu. Menurut Mardikanto *et al.* (2011) dengan adanya peningkatan nilai berat jenis kayu, maka kekuatan kayu akan meningkat karena berat jenis kayu berkorelasi positif dengan kekuatan. Menurut Arinana dan Diba (2009) menyatakan bahwa peningkatan MOE dan MOR pada kayu densifikasi terjadi karena densifikasi menyebabkan struktur sel menjadi lebih padat dan merata selain adanya kristalisasi molekul selulosa dalam daerah amorf dari mikrofibril.

KESIMPULAN

Metode densifikasi dengan menggunakan perlakuan pengukusan dapat meningkatkan kualitas kayu pulai. Hasil penelitian menunjukkan waktu pengukusan memberikan pengaruh nilai kadar air, kerapatan, *modulus of elasticity* dan *modulus of rupture*. Hasil *Duncan* menunjukkan nilai kadar air untuk waktu pengukusan 75 menit tidak memberikan perbedaan nyata dengan waktu pengukusan 60 menit dan berbeda nyata dengan waktu pengukusan 30 menit, 45 menit dan tanpa pengukusan. Hasil *Duncan* menunjukkan nilai kerapatan waktu pengukusan 75, 60, 45 dan 30 tidak terdapat perbedaan, hanya berbeda dengan kayu pulai tanpa pengukusan. Hasil *Duncan* menunjukkan waktu pengukusan 30, 45 dan 60 menit memberikan nilai MOE dan MOR tidak berbeda nyata dan berbeda nyata dengan waktu pengukusan 75 menit dan tanpa pengukusan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin Y, Dwianto W. 2006. Pengaruh Suhu dan Tekanan Uap Air Terhadap Fiksasi Kayu Kompresi dengan Menggunakan Close system compression. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis* 4(2): 55-60
- Arinana, Diba F. 2009. Kualitas kayu pulai (*Alstonia scholaris*) terdensifikasi (sifat fisis, mekanis dan keawetan). *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan*. 2(2).
- Basri E, Abdurachman, Dwianto. 2014. Pengaruh pengukusan dan pengempaan panas terhadap beberapa sifat kayu jabon untuk bahan mebel. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 12 (2): 169-177.
- Basri E, Prayitno TA, Pari G. 2012. Pengaruh umur pohon terhadap sifat dasar dan kualitas pengeringan kayu waru gunung (*Hibiscus Macrophyllus* Roxb). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 30(4): 243-253.
- Bodig J, Jayne BA. 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Krieger, Malabar, Fla.
- Diawanich P, Matan N, Kyokong B. 2010. Evolution of Internal Stress during Drying, Cooling and Conditioning of Rubberwood Lumber. *Holz Als Roh-Und Werkst*. 68: 1-12.
- Dwianto W. 1999. Mechanism of permanent fixation of radial compressive deformation of wood by heat or steam treatment. *Doctor Thesis*, Kyoto University. Unpublished.
- Fang CH, Mariotti N, Cloutier A, Koubaa A, Blanchet P. 2012. Densification of Wood Veneers by Compression Combined with Heat and Steam. *Eur. J. Wood Prod*. 70: 155-163
- Fu Q, Cloutier A, Laghdir A. 2016. Optimization of the Thermo-Hygro-mechanical (THM) Process for Sugar Maple Wood Densification. *BioResources*. 11: 8844-8859.

- Gong M, Lamason C, Li L. 2010. Interactive effect of surface densification and post-heat-treatment on aspen wood. *Journal of Materials Processing Technology*. 210(2): 293–296. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.013
- Guo J, Wang C, Li C, Liu Y. 2022. Effect of Acetylation on the Physical and Mechanical Performances of Mechanical Densified Spruce Wood. *Forests*. 13, 1620.
- Hartono R, Sitompul HLY, Sutiawan J, Cahyono TD, Priadi D, Diba F, Anggraini R. 2023. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.
- Huang R, Feng S, Gao Z. 2022. Effect of water/moisture migration in wood preheated by hot press on sandwich compression formation. *Holzforschung*. (76): 1003–1012. doi:10.1515/hf-2022-0077
- Jakob M, Gaugeler J, Gindl-Altmutter W. 2020. Effects of Fiber Angle on the Tensile Properties of Partially Delignified and Densified Wood. *Materials*. 13, 5405.
- Japanese Industrial Standard Z-2102. 1957. *Method of Measuring Average Width of Annual Rings, Moisture Content and Specific Gravity of Wood*. Japanese Standards Association. Japan.
- Japanese Industrial Standard Z-2103. 1957. *Method of Measuring Test for Shrinkage in Volume of Wood*. Japanese Standards Association. Japan.
- Japanese Industrial Standard Z-2113. 1963. *Method of Bending Test of Wood*. Japanese Standards Association. Japan.
- Jungstedt E, Montanari C, Östlund S, Berglund L. 2020. Mechanical Properties of Transparent High Strength Biocomposites from Delignified Wood Veneer. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf*. 133, 105853.
- Kutnar A, Kamke FA, Sernek M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology*. (43): 57–68. doi:10.1007/s00226-008-0198-1
- Laine K, Antikainen T, Rautkari L, Hughes M. 2013. Analysing density profile characteristics of surface densified solid wood using computational approach. *International Wood Products Journal*. (4): 144–149. doi:10.1179/2042645313Y.0000000031
- Mardikanto TR. 2011. *Sifat Mekanis Kayu*. Penerbit IPB Press. Bogor.
- Martawijaya A, Kartasujana I, Mandang Y.I, Prawira SA, Kadir K. 2005. Atlas Kayu Indonesia Edisi II. Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan. Bogor.
- Navi P, Girardet F. 2000. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*. 54(3): 287–293. doi:10.1515/HF.2000.048
- Neyses B, Karlsson O, Sandberg D. 2020. The effect of ionic liquid and superbase pre-treatment on the spring-back, set-recovery and Brinell hardness of surface-densified Scots pine. *Holzforschung*. (74): 303–312. doi:10.1515/hf-2019-0158
- Niklas KJ, Spatz, HC. 2010. Worldwide Correlations of Mechanical Properties and Green Wood Density. *Am. J. Bot*. 97: 1587–1594.

- Nurrachmania M. 2019. Pengaruh pra-perlakuan pengukusan (steaming) terhadap karakteristik kayu jabon terpadatkan. *Jurnal Akar*. 8(2).
- Pinna LFH, Usman, Yani A. 2016 Sifat fisik dan mekanik kayu jelutung (*Dyera costulata* Hook F.) yang didensifikasi berdasarkan suhu dan waktu kempa. *Jurnal Hutan Lestari* 4(2) pp 151-62.
- Pizzi A, Leban JM, Zanetti M, Pichelin F, Wieland S, Properzi M. 2005. Surface finishes by mechanically induced wood surface fusion. *Holz als Roh- und Werkstoff*. (63): 251–255. doi:10.1007/s00107-004-0569-8
- Rautkari L, Laine K, Kutnar A, Medved S, Hughes M. 2013. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. *Journal of Materials Science*. (48): 2370–2375. doi:10.1007/s10853-012-7019-5
- Sadatnezhad SH, Khazaeian A, Sandberg D, Tabarsa T. 2017. Continuous surface densification of wood: A new concept for largescale industrial processing. *BioResources*. (12): 3122–3132. doi:10.15376/biores.12.2.3122-3132
- Scharf A, Neyses B, Sandberg D. 2022. Hardness of surface densified wood. Part 1: material or product property? *Holzforschung*. (76): 503–514. doi:10.1515/hf-2021-0151
- Schwarzkopf M. 2021. Densified Wood Impregnated with Phenol Resin for Reduced Set-Recovery. *Wood Mater. Sci. Eng*. 16: 35–41.
- Skyba O, Schwarze F, Niemz P. 2009. Physical and Mechanical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM)-Densified Wood. *Wood Res*. 54: 1–18.
- Sulistiyono. 2001. Studi rekayasa teknis, sifat fisis, sifat mekanis dan keandalan konstruksi kayu agatis (*Agathis lornanthifolia* Salisb) terpadatkan. *Tesis*. Institut Pertanian Bogor.
- Thomas DS, Montagu KD, Conroy JP. 2004. Changes in Wood Density of Eucalyptus *Camaldulensis* Due to Temperature—The Physiological Link between Water Viscosity and Wood Anatomy. *For. Ecol. Manag*. 193: 157–165.
- Wang J, Liu J, Li J, Zhu JY. 2021. Characterization of Microstructure, Chemical, and Physical Properties of Delignified and Densified Poplar Wood. *Materials*. 14, 5709.
- Wardhani IY, Surjokusumo S, Hadi YS, Nugroho N. 2006. Penampilan kayu kelapa (*Cocos nucifera* Linn) bagian dalam yang dimanfaatkan. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis* 4 (2): 50-54. Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia.
- Wehsener J, Bremer M, Haller P, Fischer S. 2023. Bending Tests of Delignified and Densified Poplar. *Wood Mater. Sci. Eng*. 18: 42–50.