

Pengaruh Larutan Furfuril Alkohol Dan Nanopartikel SiO₂ pada Beberapa Metode Impregnasi Kayu JabonEsti Prihatini^{1*}, Irma Wahyuningtyas¹, Istie Sekartining Rahayu¹, Rohmat Ismail²

¹Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan,
Institut Pertanian Bogor, 16680

²Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Pertanian Bogor, 16680

*Corresponding Author: esti@apps.ipb.ac.id

Submisi: 28 April 2023; Penerimaan: 8 Agustus 2023

ABSTRAK

Salah satu cara untuk mengantisipasi kekurangan persediaan kayu berkualitas di Indonesia yaitu melalui modifikasi kayu cepat tumbuh dengan metode impregnasi kayu. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan metode impregnasi menggunakan vacuum drying oven dan tabung impregnasi dengan proses impregnasi vakum, tekan, dan vakum tekan. Kayu yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Larutan impregnasi terdiri dari tanpa perlakuan, Furfuril Alkohol (FA), dan FA yang dicampur dengan nanopartikel silika (SiO₂) menggunakan sonikator. Hasil penelitian menunjukkan metode impregnasi FA dan nanopartikel SiO₂ memberikan pengaruh nyata terhadap nilai WPG sampel tanpa perlakuan, FA, dan FA-SiO₂ 0,5%, sedangkan pada pengujian kerapatan penggunaan metode hanya berpengaruh nyata pada sampel terimpregnasi FA dan tidak berpengaruh nyata pada sampel tanpa perlakuan dan terimpregnasi FA-SiO₂ 0,5%. Hasil penelitian terbaik diperoleh pada sampel kayu Jabon terimpregnasi FA dengan metode impregnasi vakum tekan, dengan nilai weight percent gain (WPG) dan kerapatan yang diperoleh adalah 25,90% dan 0,53 kg/cm³.

Kata kunci : Furfuril Alkohol; Kayu Jabon; Nanopartikel silika; Tabung Impregnasi; Vacuum Drying Oven.

PENDAHULUAN

Kebutuhan masyarakat Indonesia akan kayu bulat semakin meningkat, namun produksi kayu berkualitas tinggi semakin menurun yang diakibatkan oleh terjadinya deforestasi (KLHK, 2017). Salah satu cara untuk memenuhi kebutuhan tersebut yaitu dengan menggunakan kayu cepat tumbuh yang berasal dari hutan tanaman rakyat, seperti kayu jabon (*Anthocephalus cadamba* Miq.). Akan tetapi, kayu cepat tumbuh memiliki beberapa kelemahan, diantaranya berat jenis, kerapatan, dan kekuatannya yang rendah. Hal ini diakibatkan oleh tingginya kandungan kayu juvenile, seperti yang dilaporkan

oleh Rahayu *et al.* (2014) bahwa porsi kayu juvenile pada kayu jabon berumur 6 tahun masih sebesar 100%. Dengan karakteristik tersebut maka kayu jabon hanya dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku kayu lapis, konstruksi ringan, dan pulp (Krisnawati *et al.*, 2011). Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan kualitas sifat fisis kayu tersebut, salah satunya dengan cara diberi perlakuan modifikasi untuk meningkatkan kualitas kayu, khususnya berat dan kerapatan kayu. Dengan demikian, kayu termodifikasi dapat dimanfaatkan sebagai bahan furniture, kusen, dan konstruksi bangunan (Prihatini *et al.*, 2023). Proses modifikasi kayu yang umum digunakan adalah

modifikasi termal, kimia, dan impregnasi. Pada penelitian ini, dilakukan proses impregnasi dengan memasukkan bahan kimia ke dalam kayu pada tekanan tertentu sehingga bahan kimia dapat terdispersi secara merata (Teng *et al.*, 2018). Penelitian mengenai impregnasi kayu sebelumnya telah dilakukan oleh Dong *et al.* (2014; 2016) dan membuktikan bahwa proses impregnasi menggunakan larutan kimia efektif meningkatkan sifat fisis dan mekanis kayu. Proses impregnasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan dua metode yaitu *vacuum drying oven* dan tabung impregnasi dengan proses impregnasi vakum, tekan, dan vakum tekan.

Penelitian ini menggunakan furfural alkohol (FA) sebagai bahan impregnasi yang akan diaplikasikan pada kayu jabon. Furfural alkohol dinilai sebagai bahan organik ramah lingkungan karena terbuat dari limbah pertanian, seperti tongkol jagung, ampas tebu, jerami padi, dan lain-lain, yang mana dapat diperbarui dan tidak mencemari lingkungan (Dubinsky *et al.*, 2018). Selain itu, FA juga cocok diterapkan pada kayu dengan noktah terbuka sehingga rongga kayu menjadi lebih padat (Teng *et al.*, 2018). Larutan FA juga telah terbukti meningkatkan ketahanan kayu pinus dan cedar terhadap serangan jamur dan rayap (Hill, 2006).

Perlakuan berbasis impregnasi nanopartikel memiliki beberapa keunggulan, seperti stabilitas disperse yang tinggi, lebih efektif dalam melapisi permukaan kayu. Selain itu, kayu memiliki sifat-sifat fungsional yang baru seperti sifat magnetik dan pendegradasi polutan (Teng *et al.*, 2018, Rahayu *et al.*, 2022a, Rahayu *et al.*, 2022b). Salah satu material yang menjanjikan yaitu nanopartikel SiO₂. Nanopartikel SiO₂ adalah material yang biasa ditambahkan

dalam bahan baku semen beton sebagai pengeras (Zhuang dan Chen, 2019). Nanopartikel SiO₂ dalam bentuk amorf tidak berbahaya bagi kesehatan dan permukaannya mampu berinteraksi dengan lingkungan biologis (Ounoughene *et al.*, 2019). Selain itu, perlakuan impregnasi kayu menggunakan nanopartikel SiO₂ juga dapat meningkatkan ketahanan kayu terhadap goresan, radiasi UV, paparan api, dan memiliki viskositas rendah sehingga efektif dalam meningkatkan kualitas kayu (Fufa dan Hovde, 2010). Sebelumnya, Rahayu *et al.* (2021) memadukan FA dan nanopartikel SiO₂ sebagai bahan impregnasi kayu ganitri dan menghasilkan kayu yang memiliki stabilitas dimensi tinggi.

Pada penelitian Dong *et al.* (2014) impregnasi nanosilika yang dilarutkan dalam FA menggunakan *vacuum drying oven*, sedangkan di Laboratorium TPMK Departemen Hasil Hutan IPB tidak memiliki alat tersebut. Alat impregnasi yang ada adalah tabung impregnasi dengan alat vakum dan tekan yang terpisah. *Vacuum drying oven* yang akan dipakai adalah oven yang ada di Laboratorium Kimia Hasil Hutan, IPB. Metode impregnasi dengan *vacuum drying oven* dan tabung impregnasi ini akan coba dibandingkan dalam penelitian ini. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dan menentukan metode yang terbaik pada proses impregnasi nanopartikel SiO₂ dengan pelarut FA sehingga dapat diaplikasikan untuk kegiatan praktikum dan penelitian di laboratorium.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan adalah Kayu jabon berumur 6 tahun yang berasal dari hutan tanaman rakyat di Bogor, Jawa Barat selanjutnya kayu

jabon dipotong tanpa membedakan kayu gubal dan kayu teras. Sampel yang digunakan berukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm sesuai dengan BS-373 1957, sebanyak 120 sampel kayu jabon. Adapun bahan kimia yang digunakan adalah Furfuril Alkohol (FA), nanopartikel silika (diameter partikel 15 ± 5 nm; Anhui Elite Industrial Co. Ltd., China), dan air akuades. Peralatan yang digunakan antara lain magnetic stirrer (IKA CMAGH), sonikator (Cole Palmer), oven (Mettler), kaliper, neraca analitik (Precisa XT 220), vacuum drying oven (WiseVen), dan tabung impregnasi.

Persiapan Larutan Impregnasi

Persiapan larutan impregnasi dalam penelitian ini memodifikasi metode penelitian dari Rahayu *et al.* (2021). Untuk mendapatkan hasil yang optimal, dibutuhkan total larutan sebanyak 500 ml untuk setiap perlakuan supaya semua sampel kayu terendam dalam larutan. Larutan impregnasi terdiri dari FA dan nanopartikel SiO₂ yang dicampur menggunakan *magnetic stirrer* selama 24 jam, kemudian dilanjutkan pencampuran menggunakan sonikator (Cole Parmer) dengan amplitude 40% selama 30 menit. Komposisi campuran FA dan nanopartikel SiO₂ dapat dilihat pada Tabel 1.

Proses Impregnasi

Penelitian ini menggunakan tiga perlakuan larutan impregnasi yang telah ditampilkan pada Tabel 1, yang diaplikasikan pada empat proses impregnasi yang berbeda, dengan masing-masing 10 kali ulangan pada

setiap perlakuan. Proses impregnasi tersebut diadaptasi dari metode penelitian Dong *et al.* (2014) dan Rahayu *et al.* (2020). Berikut merupakan penjelasan langkah-langkah proses impregnasi yang dilakukan pada penelitian ini.

Impregnasi Menggunakan Vacuum Drying Oven

Proses impregnasi diawali dengan merendam contoh uji bersama larutan impregnasi di dalam vacuum drying oven, dengan vakum sebesar 0,5 bar selama 60 menit. Contoh uji yang sudah diimpregnasi kemudian dibungkus aluminium foil untuk proses polimerisasi pada suhu ruang selama 12 jam, dilanjutkan pada suhu 100 °C selama 12 jam di dalam oven. Setelah itu, aluminium foil dilepas dan contoh uji dikeringkan pada oven bersuhu 103 ± 2 °C hingga mencapai berat konstan.

Impregnasi Tekan Menggunakan Tabung Impregnasi

Contoh uji dimasukkan ke tabung impregnasi dalam keadaan sudah direndam larutan impregnasi. Tabung diberi tekanan sebesar 2,5 bar selama 2 jam untuk menekan cairan supaya masuk ke dalam kayu. Setelah selesai, contoh uji dikeluarkan, dibasuh menggunakan tissue, kemudian dibungkus aluminium foil untuk proses polimerisasi. Contoh uji dioven selama 12 jam pada suhu 100 °C, dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu 103 ± 2 °C selama 24 jam hingga mencapai berat konstan.

Tabel 1. Perbandingan komposisi larutan impregnasi

Perlakuan	FA (ml)	Air (ml)	Nanopartikel SiO ₂ (g)
Tanpa perlakuan	0	500	0
FA	250	250	0
FA-SiO ₂ 0,5%	250	250	2,5

Impregnasi Vakum Menggunakan Tabung Impregnasi

Contoh uji dimasukkan ke tabung impregnasi dalam keadaan sudah direndam larutan impregnasi. Tabung diberi vakum sebesar 0,5 bar selama 1 jam untuk menghilangkan udara dalam kayu. Setelah itu, contoh uji didiamkan di dalam tabung impregnasi hingga mencapai tekanan atmosfer selama 2 jam. Contoh uji kemudian dikeluarkan, dibasuh menggunakan tissue, dan dibungkus aluminium foil untuk proses polimerisasi. Contoh uji dioven selama 12 jam pada suhu 100 °C, dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu 103 ± 2 °C selama 24 jam hingga mencapai berat konstan.

Impregnasi Vakum-Tekan Menggunakan Tabung Impregnasi

Contoh uji direndam bersama larutan impregnasi di dalam tabung impregnasi. Tabung diberi vakum sebesar 0,5 bar selama 1 jam, dilanjutkan dengan pemberian tekanan sebesar 2,5 bar selama 2 jam. Setelah itu, contoh uji dikeluarkan dari tabung, dibasuh menggunakan tissue, lalu dibungkus aluminium foil untuk proses polimerisasi. Contoh uji didiamkan pada suhu ruangan selama 12 jam, kemudian dimasukkan ke dalam oven bersuhu 100 °C selama 12 jam, lalu dilanjutkan proses pengeringan pada suhu 103 ± 2 °C hingga mencapai berat konstan.

Pengujian WPG dan Kerapatan Kayu Terimpregnasi

Pengujian *weight percent gain* (WPG) dan kerapatan kayu (ρ) dihitung dengan Persamaan 1 dan 2.

$$WPG (\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\rho (g/cm^3) = \frac{W_1}{V_1} \quad (2)$$

dengan W_0 adalah berat kering oven sampel sebelum impregnasi, W_1 berat kering oven sampel setelah impregnasi,

dan V_1 volume sampel setelah impregnasi.

Analisis Data

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap pola faktorial dan dievaluasi menggunakan ANOVA, dilanjutkan dengan uji *Duncan* pada $\alpha = 5\%$ (Aleong & Howard, 1985). Pengujian dilakukan menggunakan program IBM SPSS Statistics (*Statistical Package for Service Solutions*) versi 25.0. Uji *Duncan* menggunakan Persamaan 3.

$$R_p = r_{\alpha,p,v} \sqrt{MSE/n} \quad (3)$$

dengan

MSE = Mean squared error

r = pengulangan

α, p, v = Rentang nilai signifikan uji

Duncan

n = derajat kebebasan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemberian perlakuan modifikasi kayu terhadap kayu jabon menggunakan FA dan nanopartikel SiO₂ terbukti mampu meningkatkan berat kayu jabon. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan nilai WPG dan kerapatan kayu jabon setelah proses impregnasi (Tabel 2). Hasil analisis keragaman ($P < 0,05$) menunjukkan interaksi antara perlakuan dan metode impregnasi berpengaruh nyata terhadap nilai WPG dan kerapatan kayu jabon setelah impregnasi FA dan nanopartikel SiO₂. Peningkatan nilai WPG tersebut disebabkan oleh masuknya FA dan nanopartikel SiO₂ ke dalam noktah dan dinding sel kayu (Dong *et al.*, 2014). FA yang memasuki dinding sel kayu mampu menggantikan air bebas dan air terikat yang biasa menempati rongga-rongga kayu. Dengan demikian, proses polimerisasi yang terjadi juga menyebabkan FA mengalami polikondensasi insitu membentuk polimer resin dan berikatan dengan komponen penyusun dinding sel kayu

sehingga sifat fisis kayu meningkat (Bi *et al.*, 2021, Wahyuningtyas *et al.*, 2022).

Pada Tabel 2, nilai WPG tertinggi diperoleh pada sampel kayu jabon perlakuan FA dengan metode vakum tekan. Hal tersebut terjadi karena pada metode ini perlakuan vakum diberikan terlebih dahulu untuk mengeluarkan udara yang berada dalam rongga kayu, sehingga saat pemberian tekanan bahan impregnan dapat masuk ke dalam noktah kayu secara maksimal. Sesuai dengan pernyataan Teng *et al.*, (2018) bahwa impregnasi dengan metode vakum-tekan menyebabkan bahan kimia lebih cepat masuk dan berikatan dengan komponen penyusun dinding sel. Berbeda dengan metode vakum dan *vacuum drying oven*, udara yang ada di dalam kayu mampu dikeluarkan namun tidak ada pemberian tekanan sehingga bahan impregnan tidak masuk secara maksimal ke dalam kayu. Sama halnya dengan metode vakum dan *vacuum drying oven*, nilai WPG yang diperoleh pada metode tekan juga tidak optimal disebabkan oleh bahan impregnan yang ditekan untuk memasuki rongga kayu tanpa mengeluarkan udara yang ada di dalam kayu terlebih dahulu. Noktah kayu yang terbuka dan ukuran partikel bahan impregnan juga menjadi faktor yang mempengaruhi kecepatan penetrasi bahan kimia ke dalam kayu. Semakin kecil ukuran partikel maka semakin mudah untuk berpenetrasi dan terdistribusi di dalam rongga sel kayu (Hill, 2006). Rendahnya nilai WPG pada sampel kayu jabon perlakuan FA-SiO₂ 0,5% juga diduga karena terjadinya

aglomerasi pada mulut noktah dan bergumpal membentuk ukuran partikel yang lebih besar sehingga menutup akses masuk bahan impregnan ke dalam dinding sel kayu (Rahayu *et al.*, 2021). Akan tetapi secara keseluruhan impregnasi baik dengan FA maupun FA-nanosilika kenaikan WPG paling tinggi terjadi pada metode impregnasi vakum tekan.

Terjadinya peningkatan nilai WPG juga menyebabkan nilai kerapatan kayu jabon setelah impregnasi meningkat (Tabel 3). Tsoumis (1991) mendefinisikan kerapatan sebagai perbandingan antara berat dan volume kayu yang dinyatakan dalam satuan kg/m³ atau g/cm³. Tabel 2 menunjukkan nilai kerapatan tertinggi diperoleh pada sampel perlakuan FA pada metode impregnasi vakum tekan. Furfuril alkohol dan SiO₂ berperan sebagai bulking agent sehingga berat dan dimensi kayu jabon meningkat setelah impregnasi serta menyebabkan struktur kayunya menjadi semakin padat. Hasil penelitian Hadi *et al.*, (2013) menyebutkan bahwa nilai kerapatan kayu jabon setelah diimpregnasi menggunakan *methyl methacrylate* mengalami peningkatan yang signifikan dari sebelumnya. Sejalan dengan hasil penelitian Hill (2006) bahwa FA yang telah membentuk polimer ketika pada saat proses sonikasi, baik dengan sesama monomer FA maupun dengan nanopartikel SiO₂, diduga dapat mempercepat penetrasi pada proses impregnasi dan mampu memperkuat dinding sel kayu.

Tabel 2. Nilai WPG (%) pada beberapa perlakuan dan metode impragnasi

Perlakuan	Metode impregnasi			
	Vakum tekan	Vakum	Tekan	Vacuum dry oven
Tanpa perlakuan	-0,26 ± 0,23 ^a	-0,19 ± 0,42 ^a	0,32 ± 0,22 ^a	0,30 ± 0,20 ^a
FA	25,90 ± 0,72 ^e	23,40 ± 9,93 ^d	16,05 ± 9,24 ^c	13,46 ± 5,80 ^b
FA-SiO ₂ 0,5%	18,70 ± 3,27 ^c	16,26 ± 2,55 ^c	12,69 ± 1,79 ^b	13,73 ± 2,17 ^b

^{a-e} huruf dibelakang angka yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata (P<0,05).

Keterangan: FA = Furfuril alkohol, FA-SiO₂ = Furfuril alkohol – silikon dioksida

Tabel 3. Nilai kerapatan (ρ) pada beberapa perlakuan dan metode impragnasi

Perlakuan	Metode impragnasi			
	Vakum tekan	Vakum	Tekan	Vacuum dry oven
Tanpa perlakuan	0,29 ± 0,03 ^a	0,29 ± 0,02 ^a	0,29 ± 0,02 ^a	0,29 ± 0,03 ^a
FA	0,35 ± 0,04 ^e	0,34 ± 0,04 ^d	0,30 ± 0,03 ^b	0,30 ± 0,02 ^b
FA-SiO ₂ 0,5%	0,32 ± 0,02 ^c	0,32 ± 0,03 ^d	0,33 ± 0,02 ^d	0,32 ± 0,02 ^c

^{a-e} huruf dibelakang angka yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata ($P < 0,05$).

Keterangan: FA = Furfuril alkohol, FA-SiO₂ = Furfuril alkohol – silikon dioksida

Dari data kerapatan dari semua metode yang digunakan, menunjukkan metode impragnasi menggunakan vakum tekan masih lebih unggul di banding metode vacuum drying oven, impragnasi dengan vakum, dan impragnasi dengan tekan. Artinya metode impragnasi dengan menggunakan vakum tekan juga bisa digunakan untuk impragnasi nanosilika menggunakan pelarut FA.

KESIMPULAN

Interaksi antara perlakuan dan metode impragnasi FA dan nanopartikel SiO₂ memberikan pengaruh nyata terhadap nilai WPG dan kerapatan kayu jabon. Nilai WPG dan kerapatan tertinggi diperoleh pada sampel kayu jabon perlakuan FA yang diimpragnasi dengan metode vakum tekan, dengan nilai weight percent gain (WPG) dan kerapatan yang peroleh adalah 25,90% dan 0,53 kg/cm³. Peningkatan nilai WPG dan kerapatan kayu disebabkan oleh bahan impregnan yang berhasil masuk ke dalam rongga kayu jabon. Oleh karena itu, metode yang paling efektif untuk meningkatkan WPG dan kerapatan kayu jabon dengan impragnasi nanopartikel SiO₂ adalah metode impragnasi vakum tekan dengan FA sebagai bahan impregnannya. Ini juga berarti metode impragnasi menggunakan tabung impragnasi dengan vakum dan tekan bisa digunakan selain vacuum drying oven.

DAFTAR PUSTAKA

- Aleong, J., & Howard, D. (1985). Extensions of the duncan's multiple range test for unbalanced data. *Journal of Applied Statistics*, 12(1), 83–90. <https://doi.org/10.1080/02664768500000009>
- Bi, W., Li, H., Hui, D., Gaff, M., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O., & Ashraf, M. 2021. Effects of chemical modification and nanopartikeltechnology on wood properties. *Nanopartikeltechnology Reviews* 10(1): 978-1008. DOI: 10.1515/ntrev-2021-0065.
- Dong, Y., Yan, Y., Zhang, S., & Li, J. 2014. Wood/polymer nanopartikelcomposites prepared by impregnation with furfuryl alcohol and nanopartikel-SiO₂. *Bioresources* 9(4): 6028-6040. DOI: 10.15376/biores.9.4.6028-6040.
- Dong, Y., Yan, Y., Zhang, Y., Zhang, S., & Li, J. 2016. Combined treatment for conversion of fast-growing poplar wood to magnetic wood with high dimensional stability. *Wood Science and Technology* 50(3): 503-517. DOI: 10.1007/s00226-015-0789-6.
- Dubinsky, J., Zagars, A., Snidvongs, S., & Hirunlabh, J. (2018). Furfuryl alcohol made from agricultural waste, review. *The Fourth National and Third International Academic Symposium. Innovation and Technology for Social Development*
- Fufa, S. M., & Hovde, P. J., 2010. Nanoparticle-based modifications of wood and their environmental

- impact: Review. *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, 20-24 Juni 2010, Trentino, Italy. 2387-2388.
- Hadi, Y. S., Rahayu, I. S., & Danu, S. 2013. Physical and mechanical properties of methyl methacrylate impregnated jabon wood. *Journal Indian Academy of Wood Science* 10(2): 77-80.
- Hill, C. A. S. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal, and Other Processes*. West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2017. *Statistik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Tahun 2017*. Bogor (ID): Pusat Data dan Informasi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Krisnawati, H., Kallio, M., & Kanninen, M. 2011. *Anthocephalus cadamba* Miq.: *Ekologi, Silvikultur, Produktivitas*. Bogor (ID): CIFOR.
- Ounoughene, G., Chivas, J. C., Longuet, C., Le Bihan, O., Cuesta, L., & Le Coq, L. 2019. Evaluation of nanopartikel-SiO₂ emission in polydimethylsiloxane composite during incineration. *Journal of Hazardous Material* 371: 415-422.
- Prihatini, E., Wahyuningtyas, I., Rahayu, I. S., & Ismail, R. (2023). Modification of fast-growing wood into magnetic wood with impregnation method using Fe₃O₄ nanoparticles. *Jurnal Sylva Lestari* 11(2): 204-217. DOI: 10.23960/jsl.v11i2.651
- Rahayu, I., Darmawan, W., Nawawi, D. S., Prihatini, E., Ismail, R., & Laksono, G. D. (2022). Physical properties of fast-growing wood-polymer nano composite synthesized through TiO₂ nanoparticle impregnation. *Polymers* 14(20): 4463. <https://doi.org/10.3390/polym14204463>
- Rahayu, I., Prihatini, E., Ismail, R., Darmawan, W., Karlinasari, L., & Laksono, G. D. (2022). Fast-growing magnetic wood synthesis by an in-situ method. *Polymers* 14(11): 2137. <https://doi.org/10.3390/polym14112137>
- Rahayu, I., Darmawan, W., Nugroho, N., Nandika, D., & Marchal, R. 2014. Demarcation point between juvenile and mature wood in sengon (*Falcataria moluccana*) and jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Journal of Tropical Forest Science* 26(3): 331-339.
- Rahayu, I., Darmawan, W., Zaini, L. H., & Prihatini, E. 2020. Characteristics of fast-growing wood impregnated with nanoparticles. *Journal of Forestry Research* 31(2): 677-685. DOI: 10.1007/s11676-019-00902-3.
- Rahayu, I., Wahyuningtyas, I., Zaini, L. H., Darmawan, W., Maddu, A., & Prihatini, E. 2021. Physical properties of impregnated ganitri wood by furfuryl alcohol and nanopartikel-SiO₂. *The 13th International Symposium of Indonesian Wood Research Society. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 891: 1-9.
- Teng, T. J., Arip, M. N. M., Sudesh, K., Nemoikina, A., Jalaludin, Z., Ng, E. P., & Lee, H. L. 2018. Conventional technology and nanopartikel technology in wood preservation: A review. *Bioresources* 13(4): 9220-9252. DOI: 10.15376/biores.13.4.Teng.
- Tsoumis, G. 1991. *Wood as Raw Material: Source, Structure, Chemical, Composition, Growth, Degradation, and Identification*. Oxford (US): Pergamon Press.
- Wahyuningtyas, I., Rahayu, I., Maddu, A., & Prihatini, E. 2022. Magnetic properties of wood treated with nanopartikel-magnetite and furfuryl alcohol impregnation. *Bioresources* 17(4): 6496-6510. DOI: 10.15376/biores.17.4.6496-6510.
- Zhuang, C., & Chen, Y. (2019). The effect of nano-SiO₂ on concrete properties; A review. *Nanotechnology Reviews* 8(1): 562-572.