

Mikrostruktur dan Karakteristik Permukaan Kayu Pinus Scots (*Pinus sylvestris* L.) Termodifikasi Gliserol dan Asam Sitrat

(Microstructure and Surface Characteristics of Glycerol and Citric Acid Modified Scots Pine Wood (*Pinus sylvestris* L.))

Gabriel Tobing¹, Nurul Sofiatrizkiyah¹, Efrida Basri^{1,2}, Resa Martha^{1,3}, Istie Sekartining Rahayu¹, Philippe Gérardin³, Wayan Darmawan^{1*}

(Diterima Oktober 2023/Disetujui Juli 2024)

ABSTRAK

Kayu pinus scots (*Pinus sylvestris* L.) adalah salah satu produk ekspor kayu yang terpopuler. Akan tetapi, keawetannya yang rendah dapat mengurangi potensi dan pemanfaatannya. Modifikasi kimia merupakan salah satu solusi untuk mengatasi kelemahan ini. Modifikasi kimia menggunakan bahan non-biosida gliserol dan asam sitrat dilakukan untuk memperbaiki sifat-sifat kayu yang inferior. Tujuan penelitian ini adalah mengamati mikrostruktur dan mengevaluasi karakteristik permukaan kayu pinus scots yang dimodifikasi dengan gliserol dan asam sitrat. Kayu dimodifikasi menggunakan gliserol dan asam sitrat dengan nilai penambahan bobot (*weight percent gain*, WPG) 20% dan 46%. Karakteristik permukaan yang diukur meliputi kekasaran permukaan, energi bebas permukaan (*surface free energy*, SFE), keterbasahan, dan daya lekat. Hasilnya menunjukkan bahwa modifikasi kimia menggunakan gliserol dan asam sitrat memberikan struktur kayu pinus yang lebih terisi dan lebih padat. Modifikasi ini juga dapat mengurangi kekasaran permukaan kayu yang juga berakibat pada penurunan nilai SFE, peningkatan sudut kontak, dan penurunan keterbasahan pada permukaan kayu. Hal ini dapat menyebabkan penurunan daya lekat karena kayu tidak memiliki kekuatan untuk mengunci secara mekanis dengan cat. Kayu pinus scots termodifikasi gliserol dan asam sitrat dapat dipertimbangkan untuk aplikasi eksterior.

Kata kunci: asam sitrat, gliserol, karakteristik permukaan, pinus scots, struktur mikro

ABSTRACT

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood is one of the most popular timber export products. However, its low durability can reduce the potential and utilization of the wood. Chemical modification is one of the solutions to overcome this drawback. Chemical modification using non-biocide materials such as glycerol and citric acid was carried out to improve the inferior properties of wood. The study aimed to observe the microstructure and evaluate the surface characteristics of glycerol and citric acid-modified scots pine wood. Scots pine wood was modified using glycerol and citric acid with weight percent gain (WPG) values of 20% and 46%. Surface characteristics were measured, including surface roughness, surface free energy (SFE), wettability, and bonding quality. The results show that chemical modification using glycerol and citric acid resulted in the structure of the pine wood being more filled and denser. The modification could also reduce the roughness of the wood surface, resulting in decreased SFE value, increased contact angle, and decreased wettability on the wood surface. It might cause a decrease in the bonding quality because the wood did not have the strength to mechanically lock with the paint. Glycerol and citric acid modified-scots pine wood can be considered for exterior application.

Keywords: citric acid, glycerol, microstructure, scots pine, surface characteristics

PENDAHULUAN

Pinus scots (*Pinus sylvestris* L.) merupakan salah satu jenis kayu yang memiliki ketersediaan dan potensi besar dalam industri kayu di Eropa. Kayunya biasa digunakan sebagai bahan baku di berbagai industri

seperti venir, kertas, furnitur, dan penggunaan konstruksi interior maupun eksterior. Potensi dan penggunaannya tersebut membuat kayu ini menjadi salah satu primadona dalam kegiatan ekspor produk kayu. Namun, keawetannya relatif rendah; pada bagian teras digolongkan ke dalam kelas awet IV hingga III dan bagian gubal digolongkan ke dalam kelas awet V (Kozakiewicz *et al.* 2014). Oleh karena itu, kayu perlu dimodifikasi guna mengatasi kelemahan tersebut, salah satunya adalah melalui modifikasi kimia.

Modifikasi kimia merupakan reaksi antara pelarut kimia non-toksik dengan gugus fungsi OH (gugus hidroksil) pada dinding sel kayu, baik terhadap komponen selulosa, hemiselulosa, maupun lignin (Hill

¹ Departemen Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

² Pusat Penelitian Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Raya Bogor-Jakarta Cibinong, Bogor 16911

³ Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Université de Lorraine, Nancy, Perancis 54000

* Penulis Korespondensi: E-mail: wayandar@indo.net.id

2011; Rowell 2012). Setiap reaksi antara pereaksi dengan gugus fungsi OH kayu baik dengan atau tanpa katalis akan membentuk ikatan kovalen yang sangat kuat (Rowell 2012; Sandberg *et al.* 2017). Tujuan utama modifikasi kimia adalah meningkatkan kestabilan dimensi dan ketahanan kayu terhadap organisme pelapuk/perusak (Rowell 2012; Papadopoulos *et al.* 2019; Mantanis *et al.* 2020). Hal ini karena gugus hidroksil kayu merupakan gugus fungsi yang paling reaktif penyebab ketidakstabilan dimensi kayu dan tempat tumbuh yang baik bagi jamur perusak kayu. Melalui modifikasi kimia, gugus hidroksil tersebut digantikan dengan bahan kimia yang digunakan (Ross 2021).

Gliserol ($C_3H_8O_3$) memiliki tiga gugus hidroksil yang terikat pada senyawa propana dan 1,2,3- trihidroksi propana (Carnejo *et al.* 2017; Febri 2018). Senyawa kimia gliserol merupakan parameter penting yang memengaruhi sifat mekanis kayu karena efek plastisnya pada pembentukan matriks polimer (Rusli *et al.* 2017). Di sisi lain, asam sitrat ($C_6H_8O_7$, $HOC(CH_2CO_2H)_2$) merupakan asam organik lemah, termasuk bahan pengawet alami, bersifat terbarukan, dan mudah larut dalam air. Gugus OH dan COOH pada asam sitrat dapat berikatan dengan gugus OH, CO, COOH, dan COOR pada selulosa dan hemiselulosa kayu, sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya ikatan hidrogen dan ikatan silang antara asam sitrat dan selulosa serta hemiselulosa kayu. Reaksi asam sitrat dan gliserol dengan bantuan panas, tanpa atau dengan katalis, dapat membentuk ikatan ester yang menghasilkan polimer kuat (Geraud *et al.* 2016). Pada kondisi tanpa katalis, aplikasi suhu di atas $100\text{ }^\circ\text{C}$, akan mempercepat gugus OH dinding sel kayu bereaksi dengan asam sitrat dan membentuk ikatan ester (Halpern *et al.* 2013).

Selain modifikasi, kayu untuk penggunaan eksterior memerlukan penyalutan (*coating*) untuk melindungi kayu dari faktor cuaca yang ekstrem dan meningkatkan nilai estetika kayu tersebut (Darmawan *et al.* 2020; Evans *et al.* 2016). Faktor penting yang memengaruhi penyalutan adalah karakteristik permukaan. Beberapa parameter yang memengaruhi karakteristik permukaan kayu ialah kekasaran permukaan, energi bebas permukaan (*surface free energi*, SFE), dan keterbasahan (Qin *et al.* 2015). Kekasaran permukaan sangat memengaruhi keterbasahan serta daya lekat cat (alkid dan akrilik) pada permukaan kayu (Darmawan *et al.* 2018). SFE pada permukaan bahan merupakan salah satu parameter penting untuk mencirikan permukaan dan mengevaluasi sifat kimia permukaan suatu bahan (Walinder 2002), sedangkan keterbasahan merupakan kemampuan cairan untuk menyebar dan berpenetrasi pada permukaan yang solid (Baldan 2012).

Penelitian ini bertujuan mengamati mikrostruktur kayu pinus *scots* termodifikasi kimia gliserol dan asam sitrat serta mengevaluasi karakteristik permukaannya dalam hal kekasaran permukaan, SFE, keterbasahan, dan kualitas ikatan cat berbasis minyak dan air.

METODE PENELITIAN

Persiapan Sampel

Bahan yang digunakan adalah bagian gubal kayu pinus *scots* dengan ukuran $17,5\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ (longitudinal \times radial \times tangensial). Kayu tersebut telah dimodifikasi menggunakan gliserol dan asam sitrat pada penelitian Mubarak *et al.* (2023). Gliserol 99,5% dibeli dari VWR Chemicals dan asam sitrat monohidrat 99,5% dibeli dari Sigma-Aldrich. Modifikasi kimia dilakukan dengan metode impregnasi. Larutan impregnasi disiapkan dengan mencampurkan 34% asam sitrat (b/b), 10% gliserol (b/b), dan 56% air dengan pengadukan pada suhu kamar hingga larut sempurna.

Proses impregnasi diawali dengan vakum $-0,94$ bar selama 15 menit dan diikuti tekanan 12 bar selama 30 menit menggunakan larutan gliserol-asam sitrat. Selanjutnya, sampel dikeringudarkan pada suhu kamar selama 24 jam. Sampel kemudian dioven pada suhu 140°C selama 24 jam. Percobaan ini menerapkan 3 perlakuan, yaitu kayu pinus kontrol (K), kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% (A), dan kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46% (B). Bahan lain yang digunakan berupa akuades, metanol 50%, gliserin, toluena, cat alkid, dan cat akrilik.

Pengamatan Mikrostruktur Kayu

Sampel berukuran $0,5\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (longitudinal \times radial \times tangensial) disiapkan dari kayu pinus kontrol (K) dan yang telah dimodifikasi (perlakuan A dan B). Mikrostruktur diamati menggunakan mikroskop elektron FESEM-EDS (*Field Emission Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) merek Quattro S yang berasal dari PT Genecraft Labs. Alat ini menggunakan parameter vakum tinggi, dengan 2 perbesaran, yaitu $500\times$ dan $1000\times$. Mikrostruktur diamati dan dianalisis secara visual untuk mengevaluasi hubungan antara persentase WPG pada kayu yang diimpregnasi dan sifat serta kualitas permukaannya.

Pengukuran Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan sampel diukur menggunakan *Mitutoyo type SJ-210 tester*. Sensor ditempelkan di lima titik yang berbeda pada permukaan kayu dengan arah tegak lurus serat. Pengukuran berdasarkan standar ISO 4287:199 (ISO 1997) menggunakan panjang *cut off* 0,8 mm, panjang lintasan pengukuran 6 mm, dan kecepatan pengukuran 0,5 mm/detik. Parameter pengukuran kekasaran permukaan yang digunakan berupa *arithmetical mean roughness* (Ra).

Pengukuran Sudut Kontak

Sudut kontak diukur menggunakan metode *sessile drop*. Sampel diletakkan di atas meja datar dengan posisi sejajar dengan kamera. Kemudian cairan standar dan cat ditetaskan melalui suntikan dengan

metode *screw* agar diperoleh volume tetesan yang sama (0,02 mL). Tetesan dijatuhkan pada 3 titik berbeda dan direkam selama 180 detik, lalu video hasil rekaman dipotong menggunakan aplikasi *GOM Player*. Sudut kontak dari setiap potongan gambar tersebut selanjutnya diukur menggunakan *Image-J*.

Penentuan Sudut Kontak Kesetimbangan dan Nilai Keterbasahan

Sudut kontak ditentukan menggunakan program PROC NLIN dari SAS (SAS Institute 2004). Berikutnya, nilai K ditentukan berdasarkan model S/G (Shi & Gardener 2001) menggunakan program XLSTAT 2022. Model S/G menggunakan formula:

$$\theta = \frac{\theta_i \times \theta_e}{\theta_i + (\theta_e - \theta_i) \exp \left[K \left(\frac{\theta_e}{\theta_e - \theta_i} \right) t \right]}$$

Keterangan :

- θ = Sudut kontak pada waktu tertentu (°)
- θ_i = Sudut kontak awal (°)
- θ_e = Sudut kontak kesetimbangan (°)
- t = Waktu (detik)
- K = Konstanta laju perubahan sudut kontak

Penentuan SFE

SFE pada permukaan kayu (γ_s) ditentukan menggunakan *two liquid method* yang dimodifikasi menjadi *multy-liquid method* sebagaimana diusulkan oleh Rabel (1971) dengan menggunakan garis regresi dari persamaan berikut:

$$(1 + \cos \theta_e) \frac{\gamma_l}{(\gamma_l^d)^{1/2}} = (\gamma_s^d)^{1/2} + (\gamma_s^p)^{1/2} \left(\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d} \right)^{1/2}$$

Keterangan:

- θ_e = Sudut kontak kesetimbangan (°)
- γ_l = Kombinasi komponen dispersi dan polar dari fase cair
- γ_l^d = Komponen dispersi cairan
- γ_l^p = Komponen polar cairan
- γ_s^p = Energi permukaan padatan yang hanya memiliki komponen polar
- γ_s^d = Energi permukaan padatan yang hanya memiliki komponen dispersi

Jika menggunakan garis regresi $Y = (A + BX)$, dengan $Y = (1 + \cos \theta_e) \frac{\gamma_l}{(\gamma_l^d)^{1/2}}$, $X = \left(\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d} \right)^{1/2}$, maka

lereng (*slope*, B) adalah $(\gamma_s^p)^{1/2}$ dan intersep (A) adalah $(\gamma_s^d)^{1/2}$, nilai X dihitung oleh empat cairan standar (Tabel 1). Sementara itu, nilai Y dihitung dari ukuran sudut kontak cairan standar (akuades, metanol, gliserin, dan toluena) pada Tabel 1 pada setiap permukaan kayu. Nilai SFE adalah $A^2 + B^2 = ((\gamma_s^d)^{1/2})^2 + ((\gamma_s^p)^{1/2})^2$.

Pengujian Daya Lekat Cat

Daya lekat diuji dengan menempelkan *tape* di atas goresan yang telah dibuat (2 cm × 2 cm), kemudian ujung *tape* ditarik secara cepat dengan arah 45° terhadap permukaan sampel. Tingkat kerusakan dapat terlihat dari beberapa kotak kecil yang tercabut dari lapisan film cat. Klasifikasi mutu daya lekat mengacu pada standar ASTM D 3359-17 (Tabel 2).

Analisis Data

Data dianalisis menggunakan model Rancangan Acak Lengkap dengan satu faktor, yaitu perlakuan kimia (kontrol (K), termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% (A), dan termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46% (B) dengan 3 ulangan. Secara matematis persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Y_{ijk} = U + A_i + E_{ij}$$

Keterangan:

- Y_{ijk} = Nilai pengamatan dari perlakuan kimia dan panas taraf ke-*i* pada ulangan ke-*j*
- U = Rata-rata umum
- A_i = Pengaruh perlakuan ke-*i* (K, A, dan B)
- E_{ij} = Pengaruh sisa

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mikrostruktur Kayu



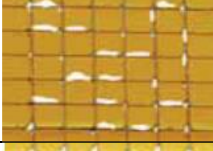
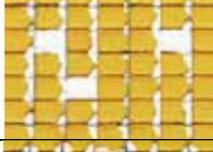
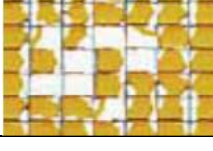
Hasil pengamatan mikrostruktur kayu pinus kontrol dan kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat pada penampang melintang ditunjukkan dalam Gambar 1. Tampak permukaan kayu pinus termodifikasi dengan WPG 46% lebih padat dan hampir seluruh lumen (rongga) kayu terisi penuh oleh bahan impregnan, dibandingkan dengan permukaan kayu pinus dengan WPG 20%. Ini mengindikasikan bahwa bahan impregnan secara intensif telah berpenetrasi ke dalam kayu dan mengisi seluruh lumen

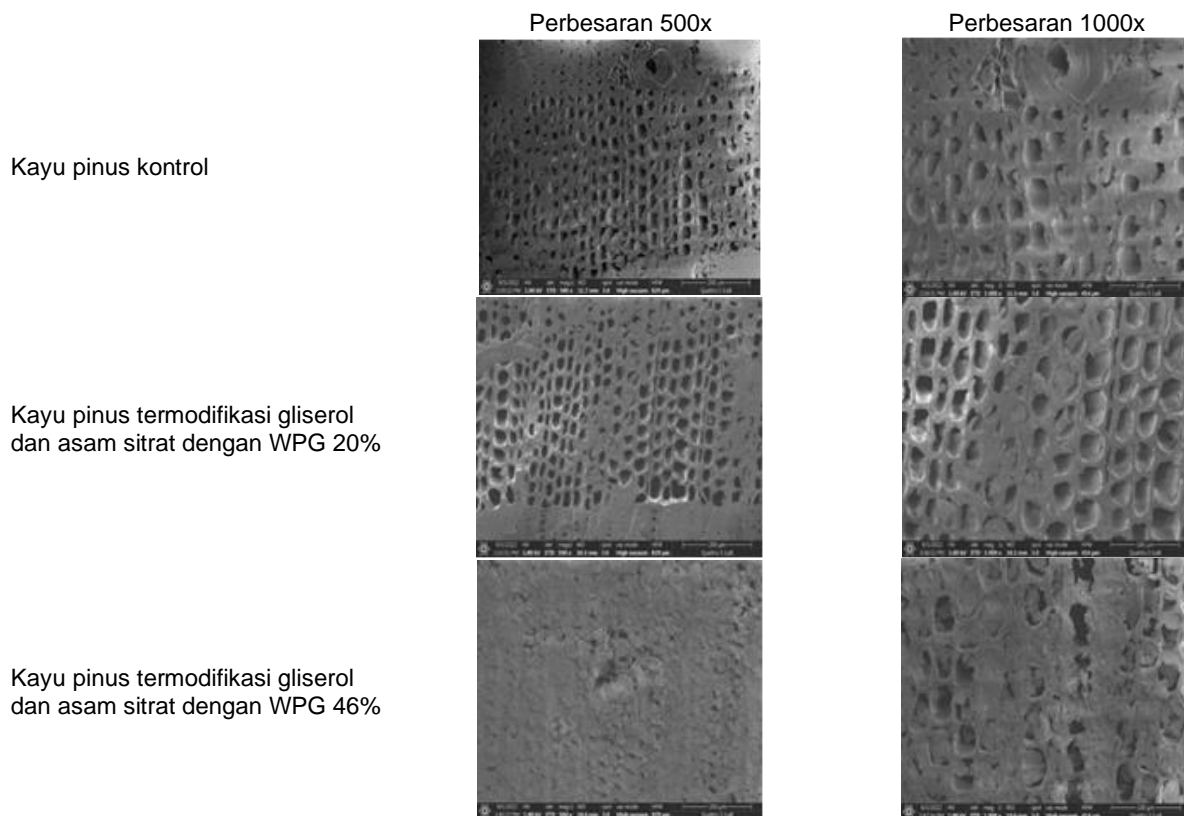
Tabel 1 Nilai tegangan permukaan cairan uji dan komponennya (dalam mJ m⁻²) yang digunakan dalam perhitungan energi bebas permukaan kayu (Yuningsih *et al.* 2019)

| Cairan Standar | γ_l^p | γ_l^d | γ_l |
|----------------|--------------|--------------|------------|
| Air | 21,8 | 51,0 | 72,8 |
| Metanol | 12,9 | 22,7 | 35,6 |
| Toluena | 2,3 | 26,1 | 28,4 |
| Gliserin | 30,0 | 34,0 | 64,0 |

Keterangan: γ_l = Nilai tegangan permukaan total, γ_l^p = Nilai komponen polar tegangan permukaan, dan γ_l^d = Nilai komponen dispersi tegangan permukaan.

Tabel 2 Klasifikasi nilai daya lekat cat penyalut pada permukaan kayu berdasarkan ASTM D 3359-02 (2004)

| Deskripsi | Tampilan permukaan | Kelas mutu |
|---|---|------------|
| Kondisi cat penyalut sepanjang garis-garis pisau mulus, tanpa ada bagian cat yang terlepas |  | 5B |
| Terdapat bagian penyalut terlepas pada titik-titik perpotongan antara garis pisau horizontal, luas permukaan cat terdelaminasi tidak lebih dari 5% |  | 4B |
| Terdapat penyalut terlepas pada titik-titik perpotongan dan garis-garis pisau baik sepanjang garis horizontal maupun garis vertikal, dengan luas permukaan cat terdelaminasi tidak lebih dari 15% |  | 3B |
| Terdapat penyalut terlepas dari garis-garis pisau baik sepanjang garis horizontal dan atau garis vertikal, dan meluas ke sebagian besar persegi, dengan luas permukaan cat terdelaminasi tidak lebih dari 35% |  | 2B |
| Terdapat penyalut terlepas dari garis-garis pisau baik sepanjang garis horizontal dan atau garis vertikal, dan meluas ke sebagian besar persegi, dengan luas permukaan cat terdelaminasi tidak lebih dari 65% |  | 1B |
| Terdapat penyalut terlepas dari permukaan dengan luas lebih dari 65% | | 0B |



Gambar 1 Penampakan struktur kayu pinus kontrol dan termodifikasi dengan perbesaran 500x dan 1000x.

(voids, microvoids) secara merata, sebagaimana dikemukakan oleh Che *et al.* (2019). Pada modifikasi kimia termal, terjadi ikatan hidrogen antara bahan impregnan dengan komponen kimia dinding sel kayu (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) dan reaksi substitusi (Astuti 2019). Gliserol dan asam sitrat sebagaimana bahan impregnan non-biosida yang lain bersifat polar dan larut dalam air. Oleh sebab itu, senyawa-senyawa kimia tersebut akan berinteraksi hanya dengan gugus komponen kimia kayu yang lebih polar seperti polisakarida (selulosa dan hemiselulosa) melalui ikatan hidrogen dan reaksi substitusi. Hill (2006) melaporkan bahwa peran lignin pada kayu dengan nilai WPG tinggi hanya sedikit. Polisakarida kayu yang telah tersubstitusi lebih berperan dalam hal ini.

Peran polisakarida tersubstitusi yang berakibat pada tingginya nilai WPG disebabkan oleh polisakarida memiliki banyak gugusan fungsional polar (khususnya gugus OH), yang dapat mengalami substitusi intensif pada gugusan-gugusan tersebut. Polisakarida kayu yang berinteraksi dengan bahan impregnan akan membentuk gugus asetil atau ester (Himmel *et al.* 2015, 2016). Interaksi tersebut menurunkan sifat higroskopisitas kayu termodifikasi. Dengan begitu, dimensi kayu akan lebih stabil dan tahan terhadap serangan organisme (Beck *et al.* 2018; Papadopoulos *et al.* 2019; Mantanis *et al.* 2020; Martha *et al.* 2021; Zelinka *et al.* 2022; Basri *et al.* 2022). Mengacu pada temuan Ringman *et al.* (2017), kayu pinus terasetilasi dengan WPG 23% sudah mampu menahan kayu tersebut dari serangan jamur pelapuk *Rhodonia placenta*. Hal ini mengindikasikan bahwa kayu pinus scots dengan WPG 46% yang diperoleh dari percobaan ini diduga memiliki ketahanan yang tinggi terhadap serangan jamur pelapuk.

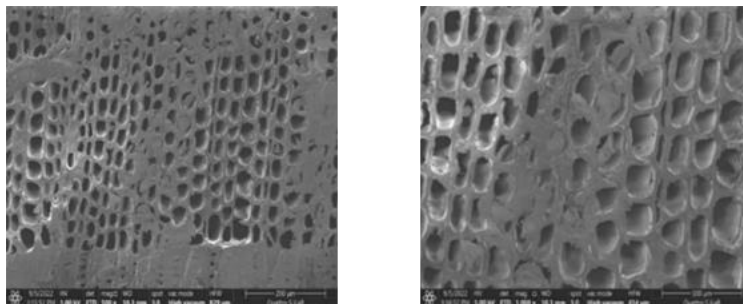
Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas permukaan kayu, terutama keterbasahannya (Candan *et al.* 2021ab; Darmawan *et al.* 2018; Dundar *et al.* 2014; Demir & Aydin 2019). Kekasaran permukaan ditunjukkan dari nilai Ra, yaitu nilai rata-rata aritmatika dan penyimpangan mutlak profil kekasaran dari garis tengah rata-rata. Semakin rendah nilai Ra, semakin halus permukaan kayu, sebaliknya semakin tinggi nilai Ra, semakin kasar permukaan kayu. Meningkatnya kekasaran permukaan kayu akan meningkatkan adhesi antara cairan dan kayu. Nilai rata-rata Ra pada kayu pinus kontrol dan kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat disajikan dalam Tabel 3. Nilai Ra tertinggi terdapat pada kayu pinus kontrol sedangkan nilai Ra terendah pada kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46%. Fenomena ini menunjukkan bahwa nilai Ra menurun secara nyata dengan perlakuan modifikasi gliserol dan asam sitrat yang diaplikasikan pada kayu. Penurunan ini terjadi karena bahan impregnan yang masuk menutupi sebagian lumen atau rongga sel kayu dan membuat permukaan kayu semakin halus (Gambar 2 dan 3). Semakin halus permukaan kayu, semakin sulit cairan menembus ke dalam kayu (Choowang & Hiziroglu 2015). Hal ini tentu dapat menurunkan daya serap cairan oleh kayu karena permukaan kayu yang halus akan menghasilkan sudut kontak yang besar sehingga cairan seperti cat atau vernis hanya tertinggal di permukaan tanpa dapat menembus ke dalam kayu (Darmawan *et al.* 2018). Selain itu, asam sitrat dapat mendegradasi komponen hemiselulosa yang disertai dengan hilangnya gugus hidroksil yang membentuk ikatan hidrogen dari gugus OH dan COOH asam sitrat dan gliserol dengan molekul air sehingga kekasaran permukaan kayu menurun. Analisis ragam memperlihatkan bahwa nilai Ra kayu

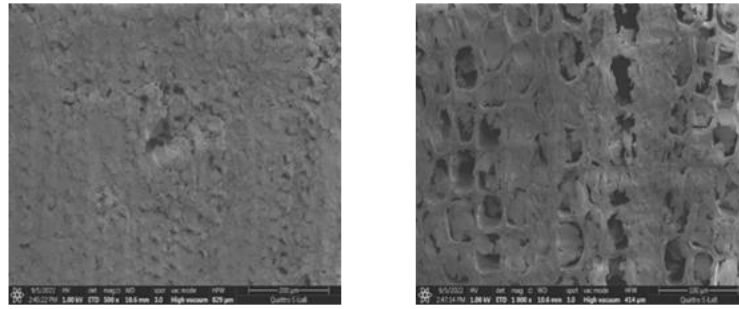
Tabel 3 Nilai kekasaran permukaan kayu pinus dengan berbagai perlakuan

| Perlakuan | Kekasaran permukaan (µm) | | |
|-----------|--------------------------|---------------|----------------|
| | Rz | Ra | Rq |
| Kontrol | 48,57±3,85 (c) | 8,47±0,84 (b) | 10,54±1,03 (c) |
| WPG 20% | 37,29±3,40 (a) | 6,18±0,57 (a) | 7,61±0,65 (a) |
| WPG 46% | 43,94±1,92 (b) | 6,74±0,55 (a) | 8,57±0,66 (b) |

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan berbeda secara nyata (α = 0,05).



Gambar 2 Penampakan struktur kayu kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% (A), perbesaran 500x (kiri) dan 1000x (kanan).



Gambar 3 Penampakan struktur kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46% (B), perbesaran 500x (kiri) dan 1000x (kanan).

pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% dan WPG 46% tidak berbeda nyata pada tingkat nyata 5%.

Energi Bebas Permukaan

SFE merupakan interaksi antara energi polar dan energi dispersi. Energi dispersi ialah hasil dari interaksi non-polar molekul, sedangkan energi polar adalah hasil dari interaksi molekul polar seperti interaksi dipol-dipol, ikatan hidrogen, dan interaksi asam basa (Yuningsih 2018). Jika SFE permukaan kayu lebih tinggi daripada tegangan permukaan (*surface tension*, ST) cairan, maka sudut kontak cenderung makin rendah, membuat energi yang ada di permukaan kayu tersebut kuat untuk menarik cairan yang jatuh dan menyebar di permukaan kayu tersebut. Hasil pengukuran SFE (Tabel 4) memperlihatkan nilai SFE tertinggi diberikan oleh sampel kayu pinus kontrol sedangkan yang terendah oleh sampel kayu termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46%. Semakin tinggi nilai SFE mengindikasikan semakin besar energi permukaan kayu, yang menyebabkan cairan menyebar dan meresap ke dalam kayu (Martha *et al.* 2020). Analisis ragam memperlihatkan semua nilai SFE kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan nilai WPG yang berbeda tidak berbeda nyata pada tingkat nyata 5%.

Fenomena nilai kekasaran permukaan kayu (R_a) berbanding lurus dengan nilai SFE. Nilai R_a yang semakin meningkat akan menyebabkan nilai SFE juga semakin meningkat karena permukaan kayu yang semakin kasar akan menghasilkan luas bidang kontak yang semakin besar, sehingga nilai SFE juga akan meningkat (Yuningsih *et al.* 2019). Berdasarkan hal tersebut, data dari percobaan ini sesuai, yaitu semua nilai R_a dan SFE kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan kayu pinus kontrol.

Sudut Kontak

Sudut kontak kesetimbangan merupakan salah satu faktor penting untuk menentukan nilai keterbasahan cairan atau bahan penyalut pada permukaan kayu (Martha *et al.* 2021). Sudut kontak berhubungan dengan tingkat penetrasi dan penyebaran cairan pada suatu permukaan (Shi & Gardner 2001). Berdasarkan

data pada Tabel 5, sudut kontak kesetimbangan cat alkid pada kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% dan WPG 46% memberikan nilai rendah. Analisis ragam menunjukkan nilai sudut kesetimbangan kayu pinus kontrol maupun termodifikasi tidak berbeda nyata pada tingkat nyata 5%. Di sisi lain, sudut kesetimbangan cat akrilik pada kayu pinus kontrol adalah paling rendah dibandingkan dengan kayu perlakuan. Ini menandakan bahwa semua perlakuan yang diberikan pada kayu pinus dapat meningkatkan sudut kesetimbangan cat akrilik. Sejalan dengan data R_a , semakin tinggi nilai R_a , semakin baik keterbasahannya. Hal ini juga sejalan dengan temuan Martha *et al.* (2020), bahwa semakin kasar permukaan kayu, semakin kecil sudut kesetimbangannya. Darmawan *et al.* (2018) juga menyatakan bahwa semakin rendah sudut kontak (θ_e), semakin tinggi R_a atau permukaan kayu semakin kasar.

Keterbasahan

Keterbasahan (*wettability*) adalah kemampuan suatu cairan untuk menyebar dan berpenetrasi pada permukaan. Keterbasahan yang tinggi, yang dikuantitatifkan dengan menggunakan nilai K yang tinggi, akan memberikan kualitas ikatan (*bonding quality*) cat atau vernis yang lebih baik dibandingkan keterbasahan yang rendah. Semakin tinggi nilai K , semakin baik keterbasahannya. Keterbasahan akan menentukan seberapa jauh cairan akan ditarik oleh suatu permukaan material (Marra 1992). Keterbasahan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kekasaran permukaan, jenis kayu, letak kayu (teras atau gubal), umur, kondisi permukaan, kondisi permesinan, jenis perlakuan, kadar air, kadar ekstraktif, jenis penyalut, tegangan permukaan, viskositas, dan suhu (Darmawan *et al.* 2018). Berdasarkan Gambar 4, nilai K alkid maupun akrilik pada kayu pinus menurun setelah kayu dimodifikasi dengan gliserol dan asam sitrat. Ini menunjukkan kayu pinus kontrol memiliki keterbasahan terbaik dengan cat alkid maupun cat akrilik. Fenomena ini juga didukung oleh nilai kekasaran kayu pinus kontrol yang lebih tinggi dibandingkan dengan kayu dengan perlakuan. Buyuksari *et al.* (2010) melaporkan bahwa keterbasahan meningkat seiring dengan meningkatnya kekasaran permukaan kayu. Selain itu, nilai K cat alkid

Tabel 4 Nilai SFE kayu pinus dengan berbagai perlakuan

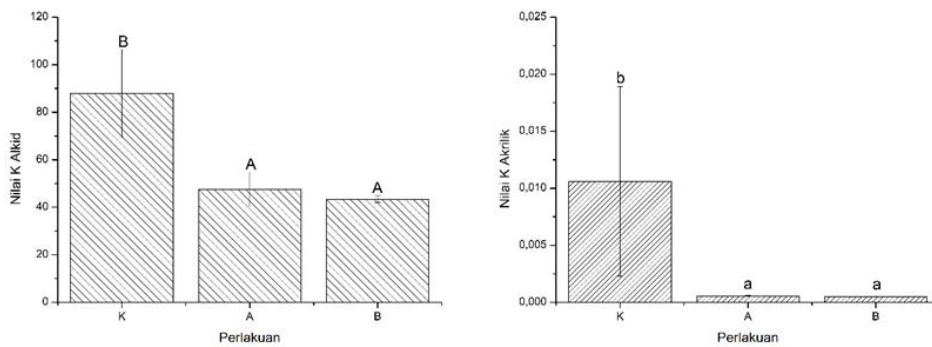
| Jenis perlakuan | Energi bebas permukaan (mJ m ⁻²) |
|-----------------|--|
| Kontrol | 40,14±7,18 (b) |
| WPG 20% | 32,42±3,96 (ab) |
| WPG 46% | 25,57±2,41 (a) |

Keterangan: Huruf yang berbeda pada tabel menunjukkan berbeda secara nyata ($\alpha = 0,05$).

Tabel 5 Nilai sudut kontak pada kayu pinus dengan berbagai perlakuan

| Perlakuan | Sudut awal (θ_i) | | Sudut kesetimbangan (θ_e) | |
|-----------|---------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
| | Alkid | Akrilik | Alkid | Akrilik |
| Kontrol | 41,26±1,30 (a) | 89,33±1,33 (c) | 0,37±0,27 (A) | 85,75±1,36 (B) |
| WPG 20% | 42,68±5,36 (ab) | 89,71±0,27 (c) | 0,29±0,36 (A) | 86,44±0,75 (B) |
| WPG 46% | 45,91±0,77 (b) | 89,68±0,63 (c) | 0,46±0,22 (A) | 87,97±0,21 (C) |

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan berbeda secara nyata ($\alpha=0.05$).



Gambar 4 Nilai K alkid (kiri) dan akrilik (kanan) kayu pinus dengan berbagai perlakuan (K= kontrol; A= termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20%; dan B= termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46%). Huruf yang berbeda pada tabel menunjukkan berbeda secara nyata ($\alpha=0.05$).

pada semua sampel kayu pinus lebih tinggi dibandingkan dengan cat akrilik. Hal tersebut karena viskositas cat alkid lebih rendah daripada cat akrilik. Keterbasahan permukaan kayu meningkat dengan cairan yang viskositasnya rendah. Analisis ragam menunjukkan bahwa nilai *K* alkid maupun nilai *K* akrilik pada kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% dan 46% tidak berbeda nyata pada tingkat nyata 5%.

Daya Lekat Cat

Daya tahan bahan penyalut pada permukaan kayu dapat ditentukan oleh daya lekat antara bahan penyalut dan permukaan kayu (Richter *et al.* 2003). Darmawan *et al.* (2018) mengemukakan bahwa permukaan kayu yang lebih halus tidak memiliki kekuatan untuk saling mengikat (mengunci) dengan kayu secara mekanis (*mechanical interlock*) sehingga melemahkan daya rekat cat tersebut dengan kayu. Hasil pengujian kualitas daya lekat cat pada Tabel 6 mengindikasikan mutu daya lekat cat menurun setelah kayu pinus dimodifikasi dengan gliserol dan asam sitrat. Semakin tinggi nilai yang didapatkan, semakin rendah kerusakan pada lapisan cat. Ini menunjukkan bahwa kayu pinus kontrol memiliki daya lekat cat yang baik dan diklasifikasikan pada kelas 4B. Sementara itu, kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat

dengan WPG 20% dan 46% diklasifikasikan pada kelas 3B.

KESIMPULAN

Kayu pinus *scots* (*Pinus sylvestris* L.) memiliki potensi yang menjanjikan tetapi tingkat keawetannya yang rendah akan membatasi penggunaan kayu tersebut. Modifikasi dengan gliserol dan asam sitrat menunjukkan hasil sebagai berikut. Hampir seluruh lumen atau rongga sel sampel kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 46%, terisi penuh oleh bahan impregnan, sedangkan sampel kayu dengan WPG 20% hanya dapat mengisi sebagian. Modifikasi gliserol dan asam sitrat menyebabkan perubahan karakteristik permukaan pada kayu pinus. Kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dengan WPG 20% dan 46% memberikan permukaan yang semakin halus yang menyebabkan energi bebas permukaan (SFE) yang semakin rendah, sudut kontak yang semakin besar, dan keterbasahan yang semakin rendah. Akan tetapi, daya lekat cat menurun pada permukaan kayu pinus termodifikasi. Kayu pinus termodifikasi gliserol dan asam sitrat dapat dipertimbangkan untuk aplikasi eksterior dengan

Tabel 6 Hasil pengujian kualitas daya lekat cat pada kayu pinus berbagai perlakuan berdasarkan ASTM D-3359-17

| Penyalut | Perlakuan | Mutu daya lekat |
|----------|-----------|-----------------|
| Alkid | Kontrol | 4B |
| | WPG 20% | 3B |
| | WPG 46% | 3B |
| Akrilik | Kontrol | 4B |
| | WPG 20% | 3B |
| | WPG 46% | 3B |

pemilihan cat yang tepat terutama untuk meningkatkan kualitas daya lekat cat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi (Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi) yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Penelitian Disertasi Doktor (PDD) tahun 2023 dengan nomor kontrak 102/E5/PG.02.00.PL/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- [ASTM] American Standard Testing and Material. 2017. ASTM D3359-17. *Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test*. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: American Standard Institution. Reapproved.
- [ISO] International Organization for Standardization. 1997. *Geometrical Product Specifications (GPS) Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters*. ISO 4287-1977. Geneva: International Organization for Standardization.
- Astuti W. 2019. *Adsorpsi Menggunakan Material Berbasis Lignoselulosa*. Semarang: Unnes Press.
- Baldan A. 2012. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 38: 95–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007>
- Basri E, Hanifah N, Martha R, Rahayu IS, Mubarak M, Darmawan W, Gérardin P. 2022. Effect of citric acid and benzophenone tetracarboxylic acid treatments on stability, durability, and surface characteristic of short rotation teak. *Forests*. 13(11): 1–15. <https://doi.org/10.3390/f13111938>
- Beck G, Hegnar OA, Fossdal CG, Alfredsen G. 2018. Acetylation of *Pinus radiata* delays hydrolytic depolymerisation by the brown-rot fungus *Rhondonia placenta*. *Int. Biodeterior. Biodegrad*. 135: 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.09.003>
- Buyuksari U, Avci E, Ayrilmis N, Akkilic H. 2010. Effect of pine cone ratio on the wettability and surface roughness of particleboard. *BioResources*. 5(3): 1824–1833. <https://doi.org/10.15376/biores.5.3.1824-1833>
- Candan Z, Gorgun HV, Korkut S, Unsal O. 2021a. Surface roughness and wettability performance of thermally modified rowan wood as a fast-growing species. *Drewno*. 64(8): 1–10. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.364.03>
- Candan Z, Gonultas O, Gorgun HV, Unsal O. 2021b. Examining parameters of surface quality performance of paulownia wood materials modified by thermal compression technique. *Drvna Industrija*. 72(3): 231–236. <https://doi.org/10.5552/drvind.2021.1973>
- Carnejo A, Barrio I, Compoy M, Lazaro J, Navarrete B. 2017. Oxygenated fuel additives from glycerol valorization. Main production pathways and effects on fuel properties and engine performance: a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79: 1400–1413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.005>
- Che W, Xiao Z, Xie Y. 2019. Modification of radiata pine wood with low molecular weight modifying agents and large molecular weight styrene/acrylic acid copolymer dispersion. *Wood Research*. 64(5): 777–788.
- Choowang R, Hiziroglu S. 2015. Properties of thermally-compressed oil palm trunks (*Elaeis chineensis*). *Journal of Tropical Forest Science*. 27(1): 39–46.
- Darmawan W, Ginting M, Gayatri A, Putri RL, Lumongga D, Hasanusi A. 2020. Influence of surface roughness of ten tropical woods species on their surface free energy, varnishes wettability, and bonding quality. *Pigment & Resin Technology*. 49(6): 441–447. <https://doi.org/10.1108/PRT-01-2020-0005>
- Darmawan W, Nandika D, Noviyanti E, Alipraja I, Gardner D, Geraldin P. 2018. Wettability and bonding quality of exterior coating on jabor and sengon wood surfaces. *Journal of Coatings Technology and Research*. 15(1): 95–104. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9954-1>
- Demir A, Aydin I. 2019. Investigation of some surface properties and thermogravimetric analysis of veneer sheets treated with fire retardants. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 21(1): 25–34.

- <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000103>
- Dundar T, Ayrilmis N, Candan Z. 2014. Evaluation of surface roughness of laminated veneer lumber (LVL) made from beech veneers treated with various fire retardants and dried at different temperatures. *Forest Products Journal*. 58(1–2): 71–76.
- Evans PD, Vollmer S, Kim JDW, Chan G, Gibson SK. 2016. Improving the performance of clear coatings on wood through the aggregation of marginal gains. *Coatings*. 6(4): 1–16. <https://doi.org/10.3390/coatings6040066>
- Febri. 2018. *Gliserol Sampah Biodiesel Bernilai Emas*. Yogyakarta (ID): CV Budi utama.
- Geraud EG, Blanchet P, Landry V, Beauregard R. 2016. Pine wood treated with a citric acid and glycerol mixture: Biomaterial performance improved by a bio-byproduct. *Bioresources* 11(2): 3049–3072. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3049-3072>
- Halpern JM, Urbanski R, Weinstock AK, Iwig DF, Mathers RT, Von Recum HA. 2013. A biodegradable thermoset polymer made by esterification of citric acid and glycerol. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 102(5): 467–477. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34821>
- Hill CAS. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. West Sussex (US): John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470021748>
- Hill CAS. 2011. Wood modification: An update. *Bioresources*. 6(2): 918–919. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.918-919>
- Himmel S, Mai C. 2015. Effects of acetylation and formalization on the dynamic water vapor sorption behavior of wood. *Holzforschung*. 69(5): 633–643. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0161>
- Himmel S, Mai C. 2016. Water vapour sorption of wood modified by acetylation and formalisation-analysed by a sorption kinetics model and thermodynamic considerations. *Holzforschung*. 70(3): 203–213. <https://doi.org/10.1515/hf-2015-0015>
- Kozakiewicz P, Jankowska A, Cichy A. 2014. Influence of thermal modification on selected. *Trieskové A Beztrieskové Obrábanie Dрева*. 9(1): 241–246.
- Mantanis GI, Lykidis C and Papadopoulos AN. 2020. Durability of accoya wood in ground stake testing after 10 years of exposure in Greece. *Polymers*. 12: 1638. <https://doi.org/10.3390/polym12081638>
- Marra AA. 1992. *Technology of Wood Bonding: Principles in Practise*. New York (US): Van Nostrand Reinhold.
- Martha R, Basri E, Setiono L, Batubara I, Rahayu IS, Gérardin P, Darmawan WD. 2021. The effect of heat treatment on the characteristics of the short rotation teak. *International Wood Products Journal*. 12(3): 218–227. <https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1953723>
- Martha R, Dirna FC, Hasanusi A, Rahayu IS, Darmawan W. 2020. Surface free energy of 10 tropical woods species and their acrylic paint wettability. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 34(2): 167–177. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1663009>
- Mubarok M, Damay J, Masson E, Fredon E, Hadi YS, Darmawan IW, Gerardin P. 2023. Improvement of durability of Scots pine against termites by impregnation with citric acid and glycerol followed by in situ polyesterification: 2023 Mei 28: Cairns, Australia. Stockholm: The International Research Group on Wood Protection. Hlm 4–12.
- Papadopoulos AN, Bikiaris DN, Mitropoulos AC, Kyzas GZ. 2019. Nanomaterials and chemical modification technologies for enhanced wood properties: A review. *Nanomaterials*. 9: 607. <https://doi.org/10.3390/nano9040607>
- Qin Z, Chen H, Gao Q, Zhang S, Li J. 2015. Wettability of sanded and aged fastgrowing poplar wood surfaces: I. Surface free energy. *BioResources*. 10(1): 1008–1023. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1008-1023>
- Qin Z, Zhang Q, Gao Q, Zhang S, Li J. 2014. *Wettability of sanded and aged fastgrowing poplar wood surface: II. Dynamic wetting models*. Beijing (TW): Beijing Forestry University. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7176-7188>
- Rabel W. 1971. Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. *Fabre und Lack*. 77(10): 997–1006.
- Richter HG, Leithoff H, Sonntag U. 2003. Characterisation and extension of juvenile wood in plantation- grown teak (*Tectona grandis* L.f.) from Ghana. *Proceedings of the International Conference on Quality Timber Products of Teak from Sustainable Forest Management*, 2003 December 2–5; Peechi, India. KFRI and ITTO. Hlm. 266–272.
- Ringman R, Pilgård A, Brischke C, Windeisen E, Richter K. 2017. Incipient brown rot decay in modified wood: Patterns of mass loss, structural integrity, moisture and acetyl content in high resolution. *International Wood Products Journal*. 8(3): 172–182. <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1344382>
- Ross R. 2021. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: Department of

- Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Rowell RM. 2012. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*: Edisi ke-2. Taylor and Francis Group (FR): CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12487>
- Rusli A, Metusalach, Salengke, Tahir MM. 2017. Karakterisasi edible film karagenan dengan pemlastis gliserol. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*. 20(2): 219–229. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v20i2.17499>
- Sandberg D, Kutnar A, Mantanis G. 2017. Wood modification technologies: A review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 10(6): 895–908. <https://doi.org/10.3832/ifor2380-010>
- SAS. 2004. *SAS/ IML 9.1 User's Guide*. USA: SAS Institute Inc.
- Shi SQ, Gardener DJ. 2001. Dynamic adhesive wettability of wood. *Wood and Fiber Science* 33(1): 58–68.
- Wålinder M. 2002. Study of lewis acid-base properties of wood by contact angle analysis. *Holzforschung*. 56(4): 363–371. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.058>
- Yuningsih I, Rahayu IS, Dumasari L, Darmawan W. 2019. Wettability and adherence of acrylic paints on long and short rotation teaks. *Journal of Wood Material Science and Engineering*. 15(5): 1–8.
- Yuningsih I. 2018. Keterbasahan dan daya lekat lapisan cat akrilik pada kayu jati rotasi panjang dan pendek [Tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Zelinka SL, Altgen M, Emmerich L, Guigo N, Keplinger T, Kymäläinen M, Thybring EE, Thygesen LG. 2022. Review of wood modification and wood functionalization technologies. *Forests*. 13(7): 1–46. <https://doi.org/10.3390/f13071004>