

**KARAKTERISTIK *ARTIFICIAL WEATHERED-BOARD*  
KAYU MAHONI DAN KAYU MINDI DENGAN  
TEKNIK *SHOU SUGI BAN***

**IMAM WAHYUDI**



**FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
2026**

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan kawasan hutan tropis terbesar ketiga di dunia, setelah Brasil dan Republik Demokratik Kongo (Rohmaningtyas 2022). Menurut Undang-Undang Kehutanan Nomor 41 Tahun 1999, berdasarkan fungsinya hutan di Indonesia dikelompokkan menjadi hutan konservasi, hutan lindung dan hutan produksi. Total luas hutan Indonesia sebesar 120 juta hektar yang terdiri dari 22,1 juta hektar hutan konservasi, 29,7 juta hektar hutan lindung dan 68,8 juta hektar hutan produksi (KLHK 2022). Kondisi tersebut menjadikan hutan Indonesia memiliki potensi sumberdaya alam yang melimpah, salah satunya adalah hasil hutan kayu. Kayu solid merupakan salah satu bentuk hasil hutan yang sampai saat ini masih banyak digunakan. Menurut Fahrussiam *et al.* (2023), kayu solid masih sangat diminati untuk pembuatan berbagai jenis produk dengan berbagai desain termasuk untuk tujuan arsitektur. Popularitasnya disebabkan oleh sifat kayu yang mudah diolah serta memiliki corak dan tekstur yang khas untuk setiap jenisnya. Meskipun tersedia berbagai produk komposit yang tampilan luarnya menyerupai kayu dengan harga yang lebih terjangkau, permintaan akan produk yang terbuat dari kayu solid tetap tinggi. Keunikan corak pada setiap jenis membuat kayu solid memiliki pangsa pasar tersendiri (Fahrussiam *et al.* 2023).

Kebutuhan kayu termasuk kayu solid di Indonesia pada era orde baru tahun 1970-an mayoritas bergantung pada hutan alam (HA). Ketergantungan tersebut menyebabkan terjadinya kerusakan atau deforestasi hutan alam yang mencapai 2,87 juta hektar per tahunnya (Halawane *et al.* 2015). Kerusakan tersebut berdampak nyata pada industri perindustri di tanah air dan produktivitas hutan alam itu sendiri sebagai pemasok utama bahan baku industri. Hal ini selaras dengan Yuniati dan Suhartana (2014) yang menyatakan seiring berjalannya waktu, pasokan kayu bulat dari hutan alam di pasaran semakin berkurang karena banyaknya perusahaan hutan alam yang tidak lagi beroperasi. Sebagai akibatnya kebutuhan industri kayu akan bahan baku beralih ke kayu hasil budidaya, seperti dari hutan tanaman rakyat (HTR) dan hutan tanaman industri (HTI) yang mayoritas dihasilkan oleh pohon cepat tumbuh (*fast growing species*) yang waktu panennya lebih singkat (Halawane *et al.* 2015). Karakteristik kayu dari pohon cepat tumbuh berpengaruh pada proses pengolahan dan kualitas produk yang dihasilkan. Jenis kayu cepat tumbuh seringkali memiliki kualitas yang lebih rendah dibandingkan kayu sejenis dari hutan alam: berat jenis dan densitasnya rendah, stabilitas dimensi rendah dan daya tahan terhadap cuaca yang rendah (Karlinsari *et al.* 2018). Kayu cepat tumbuh umumnya memiliki kelemahan dalam stabilitas dimensi yang disebabkan karena rendahnya persentase kayu teras serta tingginya persentase kayu muda (*juvenile*) (Pandit dan Kurniawan 2008). Menurut Oey Djoen Seng (1964), sekitar 15% kayu tergolong dalam kelas awet tinggi, yaitu kelas awet I dan II. Sementara itu, 85% lainnya masuk ke dalam kategori kelas awet rendah, yakni kelas III, IV dan V. Klasifikasi ini belum mencakup ketahanan alami kayu terhadap organisme laut. Kayu solid sebagai biomaterial sendiri juga memiliki sifat higroskopis yang mempengaruhi kestabilan dimensinya serta mudah diserang organisme seperti jamur. Oleh karena itu, teknologi modifikasi kayu telah dikembangkan sejak lama untuk meningkatkan

ketahanan, keawetan, karakteristik fisik dan mekanik, serta tampilan estetika permukaan kayu (Sandberg *et al.* 2019).

Teknologi modifikasi kayu dapat dibagi ke dalam beberapa kategori, antara lain modifikasi kimia, modifikasi panas, elektromagnetik, plasma dan perlakuan laser, perlakuan biologi, biometrik dan mineralisasi, superkritik, perlakuan dengan larutan ionik, serta polimerisasi (Sandberg *et al.* 2014). Teknik peningkatan kualitas produk kayu di Indonesia mayoritas masih menggunakan *chemical modification* atau pemberian bahan kimia. Penelitian oleh Sunaryo *et al.* (2019) menggunakan resin sebagai bahan finishing untuk limbah jati yang diolah menjadi produk furnitur untuk area terbuka (*public area*). Jenis modifikasi kayu saat ini mulai dipilih berdasarkan dampaknya terhadap lingkungan. Seiring meningkatnya perhatian global terhadap isu lingkungan, penggunaan teknik modifikasi berbasis kimia mulai berkurang (Lestari *et al.* 2023). Hal tersebut selaras dengan Ulker *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa penggunaan cat berbasis pelarut kimia sebagai bahan finishing berpotensi berbahaya karena mengandung senyawa organik mudah menguap, yang dikenal sebagai VOC (*volatile organic compounds*). Senyawa seperti formalin, merkuri, dan timbal yang tinggi dalam cat dapat menyebabkan masalah kesehatan serius, seperti pusing, iritasi kulit, dan mual jika terhirup. Selain itu, produk kayu yang telah difinishing dengan bahan kimia masih rentan terhadap serangan organisme perusak dan pelapukan ketika terkena paparan di luar ruangan (Yauk *et al.* 2020). Oleh karena itu, salah satu alternatif lain untuk meningkatkan kualitas kayu solid yang dapat diterapkan adalah melalui teknologi modifikasi panas atau biasa disebut dengan *thermal modification*.

Teknologi modifikasi panas merupakan salah satu modifikasi ramah lingkungan yang telah dikembangkan sejak lama untuk modifikasi kayu. Perlakuan panas pada jenis kayu cepat tumbuh komersial di Indonesia terbukti dapat meningkatkan stabilitas dimensinya (Widyorini *et al.* 2014). Perlakuan termal ini juga efektif mencegah pertumbuhan jamur perusak seperti *brown rot* dan *white rot fungi* pada kayu subtropis (Sivrikaya *et al.* 2015). Penelitian Pratiwi *et al.* (2019) menunjukkan kayu jati jenis cepat tumbuh menunjukkan peningkatan stabilitas dimensi, ketahanan terhadap serangan rayap, serta daya rekat terhadap bahan finishing setelah melalui proses pemanasan dalam oven selama 20 jam pada suhu 220 °C. Salah satu modifikasi perlakuan panas yang saat ini masih jarang diterapkan di Indonesia yakni *shou sugi ban* atau juga dikenal dengan *yakisugi*. Menurut Kymäläinen *et al.* (2017), salah satu bentuk modifikasi panas pada permukaan kayu yang kembali populer adalah modifikasi *finishing* tradisional Jepang yang bernama *yakisugi*. Modifikasi ini sudah digunakan ratusan tahun lalu oleh masyarakat Jepang, terutama pada dinding kuil. Proses *yakisugi* tradisional dilakukan dengan mengikat tiga papan membentuk segitiga memanjang, kemudian membakar bagian bawah hingga seluruh permukaan kayu berubah menjadi arang hitam sehingga membuatnya mirip dengan *natural weathered-board*.

Proses *shou sugi ban* atau *yakisugi* menciptakan produk berupa *artificial weathered-board* yang dinilai lebih mudah dan cepat pengerjaannya dibandingkan dengan *natural weathered-board*. Menurut Kropat *et al.* (2020), waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan *natural weathered-board* terlalu lama karena pelapukan secara alami merupakan ilmu yang sangat bervariasi dimana faktor cuaca yang berubah-ubah menyebabkan material yang terpapar mengalami

kondisi lingkungan yang selalu berubah. Oleh karena itu, *weathered-board* yang dihasilkan teknik *yakisugi* lebih sederhana, cepat, efisien, dan tidak memerlukan bahan kimia tambahan, sehingga lebih ramah lingkungan. Modifikasi ini semakin populer karena menghasilkan pola kayu yang alami dan estetik, serta meningkatkan ketahanan terhadap jamur, rayap (Hasburgh *et al.* 2021), dan kebakaran pada konstruksi bangunan (Machova *et al.* 2021). Teknik *yakisugi* ini memanfaatkan proses karbonisasi atau *charring* pada permukaan kayu selama pembakaran yang menyebabkan penurunan jumlah gugus hidroksil (OH), peningkatan kristalinitas selulosa, dan ikatan silang lignin, yang mengurangi kadar keseimbangan kayu hingga 20% (Cermak *et al.* 2019). Selain itu, hidrofobisitas terjadi akibat degradasi hemiselulosa dan daerah amorf selulosa (Kymäläinen *et al.* 2017). Akan tetapi, retakan pada permukaan arang membuat kayu lebih porus dan tidak mencegah masuknya air (Kymäläinen *et al.* 2018). Meski banyak penelitian mengenai peningkatan stabilitas dimensi dan keawetan setelah pembakaran, penelitian terkait teknik *yakisugi* pada jenis kayu komersial lain terutama golongan cepat tumbuh atau *fast growing species* di Indonesia masih terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait karakteristik kayu cepat tumbuh (*fast growing species*) setelah melalui proses modifikasi panas berupa teknik *yakisugi* atau *shou sugi ban*.

### **Rumusan Masalah**

Jenis kayu cepat tumbuh di Indonesia yang berasal dari HTI maupun HTR umumnya masih memiliki kualitas yang rendah baik dari segi kekuatan dan keawetan sehingga perlu dimodifikasi untuk meningkatkan kualitasnya. Jenis modifikasi kayu saat ini mulai dipilih berdasarkan dampaknya terhadap lingkungan. Modifikasi panas berupa teknik *shou sugi ban* dengan variasi lama waktu dan jarak pembakaran dianggap lebih ramah lingkungan dan masih jarang diterapkan terutama di Indonesia. Rumusan masalah yang akan diangkat berdasarkan latar belakang tersebut yakni:

1. Apakah lama waktu dan jarak bakar teknik *shou sugi ban* dapat meningkatkan kualitas permukaan kayu mahoni dan mindi dari segi warna, kekasaran, tebal arang dan sifat fisis-mekanis?
2. Bagaimana *setting* lama waktu dan jarak bakar teknik *shou sugi ban* yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas permukaan kayu mahoni dan mindi dari segi warna, kekasaran, tebal arang dan sifat fisis-mekanis?

### **Tujuan**

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh lama waktu dan jarak bakar teknik *shou sugi ban* terhadap kualitas permukaan kayu mahoni dan mindi dari segi warna, kekasaran, tebal arang dan sifat fisis-mekanis serta membandingkannya dengan kayu tanpa perlakuan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi *setting* lama waktu dan jarak bakar teknik *shou sugi ban* yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas permukaan kayu mahoni dan mindi dari segi warna, kekasaran, tebal arang dan sifat fisis-mekanis.

### **Manfaat**

Memberikan informasi tentang perubahan warna, kekasaran, tebal arang dan sifat fisis-mekanis kayu mahoni dan mindi yang termodifikasi panas melalui teknik *shou sugi ban* dan *setting* lama waktu dan jarak pembakaran yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas kayu cepat tumbuh sehingga memberikan

gambaran apakah teknik *shou sugi ban* cocok digunakan sebagai alternatif peningkatkan mutu kayu cepat tumbuh khususnya di Indonesia.

## METODE

### Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan adalah papan kayu mahoni dan mindi yang berasal dari hutan tanaman rakyat daerah Bogor Barat dan cat. Alat yang digunakan antara lain kuas, timbangan, kaliper, oven, desikator, ember rendaman, thermometer, *stopwatch*, *roll meter*, amplas grit P400 dan 120, *heating torch*, *tape cross cut*, alat Mitutoyo tipe SJ-210, kamera *handphone*, Mikroskop Digital, dan *AMTAST 8MM Digital Colorimeter* aplikasi *image J*. Serta alat uji mekanis *universal testing machine* (UTM) Instron.

### Persiapan Sampel Uji

Sampel uji yang digunakan terbagi menjadi dua jenis yakni sampel kontrol dan sampel perlakuan. Sampel diperoleh dari bentuk *log* yang digergaji menjadi potongan papan kayu mahoni dan mindi berukuran 3 cm × 15 cm × 50 cm dalam kondisi kering udara (KU) baik untuk sampel yang tidak diberi perlakuan sebagai kontrol dan yang akan diberi perlakuan *yakisugi/shou sugi ban*. Ukuran potongan sampel dan banyaknya yang digunakan untuk berbagai pengujian disajikan pada tabel 1.

Tabel 1 Ukuran dan jumlah ulangan pada tiap sampel pengujian sifat fisis dan mekanis

No	Pengujian	Ukuran (cm)	Standar	Ulangan
1	Perubahan warna	2 × 5 × 10	-	3
2	Kekasaran permukaan	2 × 5 × 10	ISO 4287:1997	3
3	Keawetan	2 × 2 × 46	ASTM D 1758-06	3
4	Kadar air	2 × 2 × 2	BS 373-1957	3
5	Kerapatan	2 × 2 × 2	BS 373-1957	3
6	Berat Jenis	2 × 2 × 2	BS 373-1957	3
7	Daya serap air	2,5 × 2,5 × 7,5	ASTM D 143-94	3
8	Kekakuan	2 × 2 × 30	BS 373-1957	3
9	Kelenturan	2 × 2 × 30	BS 373-1957	3
10	Kekerasan	3 × 5 × 15	ASTM D 143-94 (modifikasi)	3
11	Ketebalan lapisan arang	1,3 × 7 × 10	Fahrussiam <i>et al.</i> 2023 (modifikasi)	3
12	Uji daya lekat ( <i>Cross cut</i> )	2 × 5 × 10	ASTM D 3359-02	3

### Proses *Shou Sugi Ban/Yakisugi*

Papan kayu berukuran 3 cm × 15 cm × 50 cm dalam kondisi udara diampelas salah satu permukaannya dengan menggunakan amplas berukuran 400 grit supaya halus. Proses pembakaran dilakukan pada salah satu sisi permukaan papan yang telah dihaluskan tersebut menggunakan alat *torch* dengan suhu 250 °C, *setting*

jarak pembakaran 5 cm selama 4 menit serta 10 cm selama 8 menit. Permukaan kayu dibakar secara manual hingga seluruhnya berubah menjadi hitam sesuai durasi waktu dan jarak pembakaran yang ditentukan. Pembakaran dilakukan secara merata sampai permukaan kayu benar-benar hitam atau mencapai kondisi arang. Setelah permukaan mencapai warna hitam yang merata, sisa abu pembakaran diampas menggunakan amplas kasar berukuran 120 grit. Hal ini akan menghasilkan pola dan serat kayu yang lebih gelap dan tampak estetik. Papan kayu yang telah dibakar kemudian dibagi menjadi dua jenis yakni papan *shou sugi ban* yang diberi *coating* dan yang tidak diberi *coating*. Setelah itu, papan dipotong sesuai dengan standar ukuran dan jumlah ulangan sampel pada tiap jenis pengujian seperti yang tertera pada tabel 1.

### Pengukuran Perubahan Warna

Pengukuran dan analisis perbedaan warna kayu dilakukan dengan menentukan parameter  $L^*a^*b$  menggunakan *AMTAST 8MM Digital Colorimeter*. Pada setiap gambar kayu uji, dipilih 5 titik dengan jarak antar titik 2 cm yang telah ditentukan untuk mendapatkan nilai  $L^*a^*b$ . Nilai tersebut diukur sebelum dan sesudah perlakuan. Perubahan warna ( $\Delta E$ ) dihitung menggunakan metode CIELab dengan rumus sebagai berikut:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Keterangan =

$\Delta E$  = Perubahan warna

$\Delta L$  = Perbedaan nilai kecerahan sampel sebelum atau sesudah perlakuan

$\Delta a$  = Perbedaan warna merah atau hijau sebelum atau sesudah perlakuan

$\Delta b$  = Perbedaan warna kuning atau biru sebelum atau sesudah perlakuan

Tabel 2 Penilaian perubahan warna kayu

Perbedaan warna	Pengaruh
$\Delta E < 0,2$	Tidak Terlihat
$0,2 < \Delta E < 2$	Sangat Kecil
$2,0 < \Delta E < 3,0$	Kecil
$3,0 < \Delta E < 6,0$	Jelas
$6,0 < \Delta E < 12,0$	Sangat Jelas
$\Delta E > 12,0$	Terjadi Perbedaan Warna

### Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan kayu diukur menggunakan *portable surface roughness tester* alat Mitutoyo tipe SJ-210 dengan orientasi tegak lurus terhadap arah serat pada 5 titik berbeda mengacu prosedur pada ISO 4287:1997. Karakteristik kekasaran dinyatakan sebagai *mean arithmetic deviation* ( $R_a$ ), yang menggambarkan rata-rata jarak profil dari garis tengah selama pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan panjang *cut-off* 0,8 mm, lintasan 6 mm, dan kecepatan 0,5 mm/detik. Penggunaan alat ukur ini dilakukan dengan menempatkan sensor pada titik permukaan kayu yang akan diukur kekasarannya, memastikan posisi alat ukur sejajar dengan sampel uji. Alat ukur tidak boleh digerakkan selama pengukuran, karena dapat mengganggu sensor dalam membaca kekasaran permukaan dengan akurat. Pengukuran diulang jika *stylus tip* jatuh ke

dalam pori (*over range*). Tingkat kehalusan permukaan ditentukan berdasarkan klasifikasi yang disajikan pada tabel 3.

Tabel 3 Klasifikasi tingkat kehalusan permukaan

Ra	Kondisi Permukaan
< 0,1 $\mu\text{m}$	Sangat Halus
0,1 – 0,5 $\mu\text{m}$	Halus
0,5 – 2 $\mu\text{m}$	Cukup Halus
>2 $\mu\text{m}$	Kasar

### Ketebalan Arang

Pengukuran ketebalan arang dilakukan dengan meng-*scan* sisi samping sampel uji. Hasil scan sampel uji lalu diukur menggunakan bantuan aplikasi *Image J* untuk mendapatkan data tebal awal sampel sebelum pembakaran (TA), tebal akhir sampel setelah pembakaran (TK), tebal arang hasil pembakaran (TB). Tebal sampel yang hilang (TH) dihitung secara manual dengan persamaan berikut:

$$TH \text{ (cm)} = TA - TK$$

Keterangan =

TA = Tebal awal sampel sebelum pembakaran (cm)

TK = Tebal akhir sampel setelah pembakaran (cm)

TB = Tebal arang hasil pembakaran (cm)

TH = Tebal sampel yang hilang (cm)

### Pengujian Sifat Fisis Kayu

#### Kadar air

Sampel uji ditimbang berat awalnya (BA) lalu dimasukan ke oven dengan suhu  $103 \pm 2$  °C selama 24 jam, hingga beratnya konstan (BKT). Kadar air sampel uji dihitung dengan persamaan berikut:

$$KA \text{ (\%)} = \frac{BA - BKT}{BKT} \times 100$$

Keterangan =

KA = Kadar air sampel uji (%)

BA = Berat awal sampel uji (g)

BKT = Berat kering tanur sampel uji (g)

#### Kerapatan

Sampel uji ditimbang sehingga didapatkan data beratnya lalu diukur dimensinya meliputi panjang, lebar, dan tebal. Kerapatan sampel pada kondisi kering udara dihitung dengan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Keterangan =

$\rho$  = Kerapatan sampel uji kondisi kering udara ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$m$  = Massa sampel uji kondisi kering udara (g)

$V$  = Volume sampel uji kondisi kering udara ( $\text{cm}^3$ )

### **Berat Jenis**

Sampel uji dimasukan ke oven dengan suhu  $103 \pm 2$  °C selama 24 jam, hingga beratnya konstan (BKT). Berat jenis sampel uji dihitung dengan persamaan berikut:

$$BJ = \frac{\left( \frac{BKT}{V_{sampel}} \right)}{\rho_{air}}$$

Keterangan =

$BJ$  = Berat jenis sampel uji

$BKT$  = Berat kering tanur sampel uji (g)

$V_{sampel}$  = Volume sampel uji kondisi kering udara (cm<sup>3</sup>)

$\rho_{air}$  = Kerapatan air (g/cm<sup>3</sup>)

### **Daya serap air**

Sampel uji yang sudah ditimbang beratnya lalu direndam dalam air selama 24 jam pada suhu ruang. Kayu yang telah direndam selanjutnya di dikeluarkan dari rendaman, ditiriskan, lalu ditimbang kembali beratnya. Daya serap air sampel uji dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$DSA (\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

Keterangan:

$DSA$  = Daya serap air (%)

$m_0$  = Massa sampel uji sebelum perendaman (g)

$m_1$  = Massa sampel uji setelah perendaman (g)

## **Pengujian Sifat Mekanis Kayu**

### **Kelenturan dan kekakuan**

Sampel kayu diuji dengan alat UTM Instron dengan jarak sangga (*span*) sepanjang 28 cm dan kecepatan pembebanan sebesar 6,604 mm/menit. Tebal dan lebar sampel uji diukur terlebih dahulu sebelum pengujian dilakukan. Selama pengujian, besarnya beban yang diberikan pada sampel dicatat dengan cermat. Pembebanan dilakukan secara bertahap dan terus ditingkatkan hingga sampel kayu mencapai titik patah. Nilai MOE dan MOR kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$MOE = \frac{P L^3}{4\Delta b h^3}$$

$$MOR = \frac{3P_{max}L}{2bh^2}$$

Keterangan:

$MOE$  = *Modulus of elasticity* (Kg/cm<sup>2</sup>)

$MOR$  = *Modulus of rupture* (Kg/cm<sup>2</sup>)

$P$  = Beban pada batas proporsi (Kg)

$P_{max}$  = Beban maksimum (Kg)

$L$  = Jarak sangga (cm)

- $\Delta'$  = Defleksi pada batas proporsi (cm)  
 b = Lebar contoh uji (cm)  
 h = Tebal contoh uji (cm)

### **Kekerasan**

Sampel diuji secara bergantian menggunakan bantuan alat UTM (*Universal Testing Machine*) Instron dengan pembebanan sebesar 6,6 mm/menit. Tombol *switch* bagian naik ditekan untuk menaikkan posisi besi agar sampel dapat diletakkan. Setelah itu, sampel diletakkan dengan posisi sampel di ujung kanan atau kiri alat. Setelah sampel sudah sesuai dengan yang ditentukan, tombol *switch* bagian turun ditekan kembali agar sesuai dan tekan tombol merah di ujung kanan mesin. Sampel akan ditekan oleh *indenter* berbentuk bola pejal yang terbuat dari karbida tungsten secara perlahan yang akan menekan permukaan sampel uji hingga muncul data kekerasan. Setelah itu, tekan kembali tombol merah untuk menghentikan proses. Data kekerasan dapat diukur dengan rumus:

$$K = \frac{P_{max}}{A}$$

Keterangan:

- K = Kekerasan kayu (Kg/cm<sup>2</sup>)  
 P<sub>max</sub> = Beban maksimum (Kg)  
 A = Luas bidang tekan (cm<sup>2</sup>)

### **Analisis Data**

Rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) dengan satu faktor perlakuan yakni pembakaran *shou sugi ban* dengan tiga taraf yakni kontrol (tanpa pembakaran), jarak pembakaran 5 cm selama 4 menit dan 10 cm selama 8 menit dengan masing-masing ulangan sebanyak 3 kali. Data yang diperoleh lalu diolah dengan *Microsoft Excel* serta dianalisis dengan sidik ragam (ANOVA) menggunakan aplikasi *IBM Statistical Product and Service Solution* (SPSS) 26. Model matematikanya adalah sebagai berikut (Mattjik dan Sumertajaya 2013):

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

Keterangan:

- $Y_{ijk}$  = Nilai pengamatan pada faktor pembakaran ke-i, dan ulangan ke-j  
 $\mu$  = Nilai rata-rata umum  
 $\alpha_i$  = Pengaruh faktor pembakaran pada taraf ke-i  
 $\varepsilon_{ij}$  = Pengaruh sisa pada perlakuan taraf ke-i ulangan ke-j  
*i* = Variasi pembakaran (kontrol, 5 cm selama 4 menit, 10 cm selama menit)  
*j* = Ulangan (1, 2, dan 3)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perubahan Warna

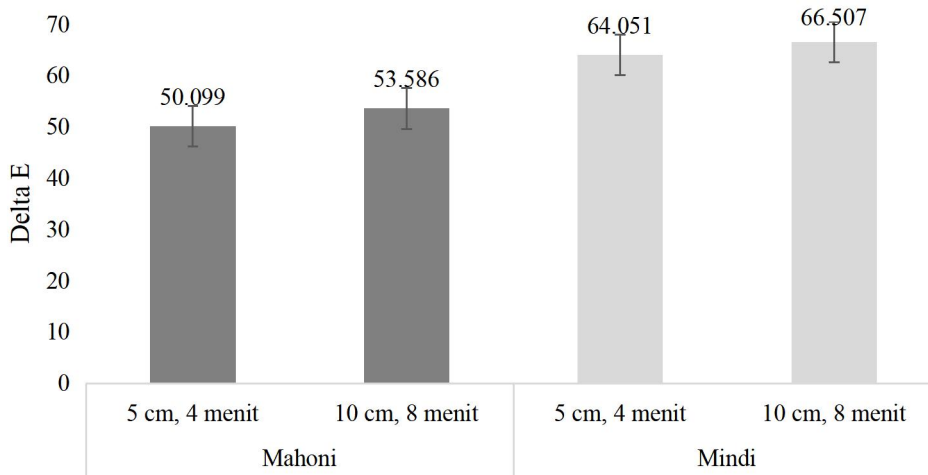
Warna pada kayu menunjukkan nilai estetika serta seringkali bisa dijadikan sebagai acuan identifikasi untuk menentukan suatu jenis kayu. Warna permukaan kayu kontrol mahoni secara visual cenderung coklat kemerahan sedangkan kayu mindi coklat terang seperti yang disajikan pada Gambar 1. Warna kayu mindi sendiri cenderung lebih cerah dibandingkan dengan kayu mahoni. Perbedaan warna antara kedua kayu ini dapat disebabkan karena keberadaan zat ekstraktif yang terkandung pada masing-masing jenis kayu tersebut. Hal ini selaras dengan Hon dan Minemura (2001), yang menjelaskan bahwa warna kayu dipengaruhi oleh kandungan zat ekstraktif yang terdapat di dalamnya. Senyawa fenolat dalam zat ekstraktif berperan dalam menentukan warna kayu pada berbagai jenis spesies. Selain itu, Prijasambada (2020) juga menjelaskan bahwa warna pada kayu sangat bervariasi tergantung pada jenisnya, yang dipengaruhi oleh kandungan zat pewarna alami seperti zat ekstraktif serta beberapa faktor lain seperti bagian kayu (teras atau gubal), tingkat kematangan (tua atau muda), waktu penebangan (sudah lama atau baru ditebang), dan kadar kelembapan (kering atau basah).



Gambar 1 Perbandingan visual permukaan kayu sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Perubahan warna terjadi pada sampel *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi pada berbagai variasi pembakaran karena memiliki nilai  $\Delta E > 12$  seperti yang disajikan pada Gambar 2. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap warna kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi  $0,000 (\leq 0,05)$ . Proses pembakaran yang terjadi pada permukaan kayu menyebabkan terjadinya degradasi komponen kimia kayu seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin serta reaksi yang terjadi pada zat ekstraktif kayu. Degradasi tersebut membuat warna kayu menjadi lebih gelap dibandingkan warna kayu sebelum diberi perlakuan. Hal ini selaras dengan Petrillo *et al.* (2018) yang menjelaskan bahwa degradasi lignin dan foto-oksidasi gugus  $-CH_2-$  dan  $-CH(OH)-$  pada proses *weathering* menghasilkan pembentukan struktur kromoforik sekunder.

Terbentuknya patina berwarna gelap (abu hingga hitam) pada permukaan kayu yang terpapar dikaitkan dengan pembentukan struktur kromoforik sekunder, yang kemudian diikuti oleh birefringensi selulosa akibat degradasi selulosa amorf dan pembentukan selektif selulosa kristalin. Selama proses perlakuan panas, sebagian besar ekstraktif dihilangkan dan terdegradasi. Oleh karena itu, perlakuan panas sepenuhnya mengubah perilaku fotokromik kayu sehingga perubahan kecerahan pada kayu yang telah diberi perlakuan panas selama proses *artificial weathering* terutama disebabkan oleh fotodegradasi lignin (Xing *et al.* 2015). Selain itu, Widyorini *et al.* (2021) juga menjelaskan bahwa perubahan warna pada kayu yang diberi perlakuan panas diduga disebabkan oleh pembentukan zat berwarna akibat oksidasi senyawa fenolat oleh udara, serta terbentuknya material gelap yang berasal dari proses hidrolisis hemiselulosa. Menurut Ebner *et al.* (2021), perubahan warna kayu menjadi coklat gelap hingga hitam merupakan karakteristik khas dari teknik finishing *yakisugi*. Lapisan hitam yang tampak pada permukaan merupakan hasil pembentukan karbon saat proses pembakaran dimulai pada suhu sekitar 270 °C, dan warna hitam akan semakin pekat ketika suhu pembakaran melebihi 400 °C.



Gambar 2 Perubahan warna sampel termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Tabel 4 Nilai delta a, b dan L sampel termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

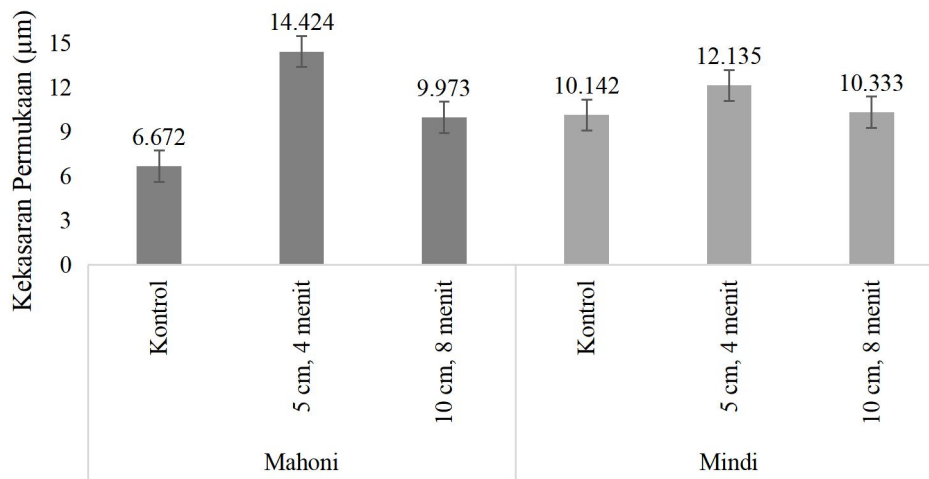
	Mahoni		Mindi	
	5 cm, 4 menit	10 cm, 8 menit	5 cm, 4 menit	10 cm, 8 menit
Delta a	-13,051	-14,457	-11,224	-17,659
Delta b	-19,559	-20,520	-25,980	-24,251
Delta L	-45,9253	-46,6067	-56,2073	-57,5373

Perubahan warna berdasarkan nilai rata-rata  $\Delta E$  yang terjadi akibat modifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi pembakaran pada kayu mindi lebih tinggi dibandingkan mahoni yang mengindikasikan bahwa permukaan kayu mindi lebih gelap dibandingkan mahoni. Variasi pembakaran memberikan

perbedaan perubahan warna yang terjadi meskipun tidak signifikan pada sampel *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 2 dan Tabel 6. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi yang menunjukkan bahwa sampel dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap warna kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Hasil tersebut selaras dengan penelitian Fahrussiam *et al.* (2023) yang menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan yang signifikan pada warna kayu pinus dan sungkai yang dibakar selama 20 dan 30 detik. Perbedaan nilai  $\Delta E$  yang lebih tinggi pada sampel dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit pada kedua jenis kayu diduga disebabkan oleh lamanya waktu pembakaran yang dilakukan. Semakin lama waktu pembakaran yang dilakukan akan membuat permukaan kayu semakin gelap atau menghitam yang ditandai dengan meningkatnya nilai  $\Delta E$  serta menurunnya nilai  $\Delta l$ ,  $\Delta a$  dan  $\Delta b$ . Penurunan pada semua nilai diperkirakan akan terjadi seiring dengan permukaan yang menjadi semakin hitam selama proses modifikasi (Kymäläinen *et al.* 2022). Degradasi pada komponen penyusun kayu meningkat yang menyebabkan penurunan kecerahan kayu seiring dengan naiknya suhu dan lamanya perlakuan panas yang diberikan (Widyorini *et al.* 2014). Fernandes *et al.* (2023) menambahkan bahwa perubahan warna pada *artificial weathered-board* mengalami peningkatan seiring berjalannya waktu. Paparan terhadap cuaca, terutama sinar UV, menyebabkan perubahan warna yang bersifat permanen, dengan kemungkinan kayu menjadi sedikit lebih gelap pada tahap tertentu.

### **Kekasaran Permukaan**

Tingkat kekasaran permukaan menjadi salah satu aspek penting dalam menilai kualitas permukaan kayu, khususnya terkait daya basahnya (Candan *et al.* 2021). Kekasaran ini diukur menggunakan nilai  $R_a$ , yaitu rata-rata aritmatika dari penyimpangan absolut profil permukaan terhadap garis tengah rata-ratanya. Nilai  $R_a$  yang lebih rendah menunjukkan permukaan kayu yang lebih halus, sedangkan nilai yang lebih tinggi menandakan permukaan yang lebih kasar. Peningkatan kekasaran permukaan dapat memperkuat daya lekat antara cairan dan permukaan kayu (Tobing *et al.* 2024). Nilai kekasaran permukaan kayu kontrol mahoni lebih rendah dibandingkan dengan kayu mindi, sedangkan pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* menunjukkan hasil yang fluktuatif, seperti yang disajikan pada Gambar 3. Kekasaran permukaan semua sampel baik kontrol dan perlakuan pada kedua jenis kayu termasuk ke dalam kategori kondisi kasar karena memiliki nilai  $R_a$  yang  $>2$   $\mu\text{m}$  berdasarkan tabel 3. Perbedaan nilai kekasaran permukaan pada sampel kontrol kedua jenis kayu ini diduga karena pengaruh diameter pori pada kayu mindi yang lebih besar dibandingkan mahoni yang menyebabkan permukaannya lebih kasar. Diameter pori kayu mindi berkisar 50-300 mikron, sedangkan kayu mahoni berkisar 130-230 mikron (Pandit *et al.* 2011). Menurut Lestari *et al.* (2016), pori-pori dengan diameter yang relatif besar dapat menyebabkan permukaan menjadi kurang rata atau tidak halus (Lestari *et al.* 2016).



Gambar 3 Kekasaran permukaan sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

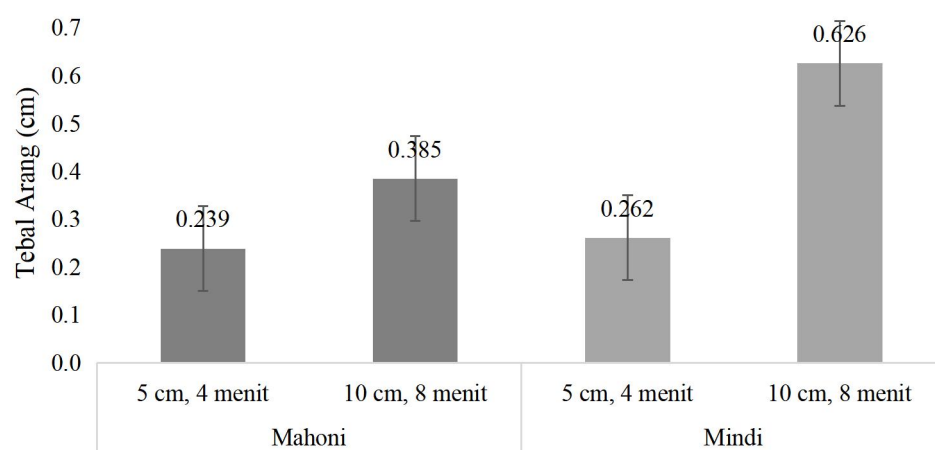
Perubahan kekasaran permukaan terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi menjadi lebih kasar karena nilai Ra yang lebih tinggi dibanding nilai Ra sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 3. Nilai Ra yang lebih rendah menunjukkan permukaan kayu yang lebih halus, sedangkan nilai Ra yang lebih tinggi menandakan permukaan yang lebih kasar (Tobing *et al.* 2024). Perbedaan nilai kekasaran antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni cenderung nyata, sedangkan pada kayu mindi tidak nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap kekasaran permukaan kayu mahoni karena memiliki nilai signifikansi  $0,000 (\leq 0,05)$ , namun tidak nyata terhadap kekasaran permukaan kayu mindi karena memiliki nilai signifikansi  $0,431 (\geq 0,05)$  pada tingkat kepercayaan 95%. Peningkatan kekasaran permukaan kayu akibat modifikasi *shou-sugi ban* disebabkan karena api pembakaran yang mengenai permukaan kayu akan menyebabkan terbentuknya lapisan arang yang kasar serta cacat berupa retakan (*cracking*) yang bersifat tidak sama atau heterogen. Hal tersebut selaras dengan penelitian Machová *et al.* (2021) yang menunjukkan bahwa spesimen radial yang dibakar pada suhu  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  mengalami peningkatan nilai kekasaran karena permukaan kayu telah mengalami deformasi akibat retakan. Kymäläinen *et al.* (2021) menambahkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan kayu akibat metode *yakisugi* disebabkan oleh proses pembakaran dimana sebuah lapisan hasil modifikasi yang tidak homogen dengan retakan berukuran bervariasi terbentuk akibat paparan nyala api yang tidak merata pada permukaan selama proses berlangsung.

Variasi pembakaran memberikan perbedaan nilai kekasaran permukaan secara signifikan terhadap sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni, namun tidak signifikan terhadap kayu mindi seperti yang disajikan pada Gambar 3. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran yang menunjukkan bahwa sampel kayu mahoni dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada *subset* yang berbeda, sedangkan pada kayu mindi berada pada *subset* sama

sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan kayu mahoni, namun tidak signifikan terhadap kekasaran permukaan kayu mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan tersebut dapat disebabkan karena nilai kerapatan serta pola lingkaran tumbuh yang berbeda antara kayu mahoni dan mindi. Kekasaran permukaan kayu dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis sel penyusun, kerapatan dinding sel, kadar air, dan metode pemrosesan (Kang *et al.* 2023). Secara lebih spesifik Lestari *et al.* (2016) menjelaskan bahwa kekasaran permukaan kayu salah satunya dipengaruhi oleh struktur makroskopis kayu yang mencakup lingkaran tumbuh, perbedaan antara kayu juvenil dan dewasa, proporsi kayu awal dan akhir, serta keberadaan mata kayu dan kayu reaksi. Nilai kekasaran permukaan pada kedua jenis kayu dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit lebih tinggi dibandingkan jarak bakar 10 cm selama 8 menit. Perbedaan nilai kekasaran tersebut disebabkan karena pengaruh jarak pembakaran dimana jarak bakar yang lebih dekat akan membuat permukaan kayu terkena suhu yang lebih tinggi dibandingkan jarak bakar yang lebih jauh. Hal ini selaras dengan Machová *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa seiring meningkatnya suhu pembakaran pada modifikasi *shou-sugi ban*, terjadi kenaikan nilai kekasaran pada spesimen kayu tangensial.

#### Ketebalan Arang

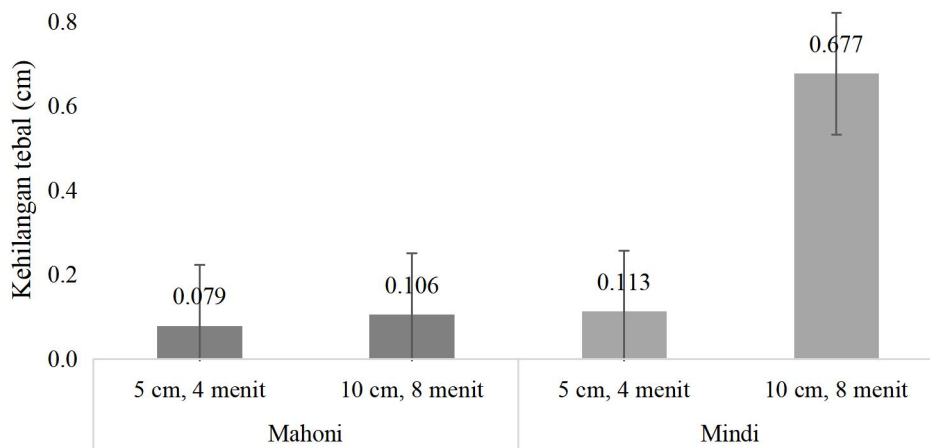
Ketebalan arang menunjukkan kualitas pembakaran yang dilakukan pada modifikasi *shou-sugi ban* (Fahrussiam *et al.* 2022). Ebner *et al.* (2021) menyebutkan istilah "kualitas arang" untuk menggambarkan konsistensi permukaan, yang sangat memengaruhi daya tahan penggunaan yang mencakup ketebalan lapisan arang. Ketebalan arang pada sampel kayu mahoni lebih rendah dibandingkan dengan kayu mindi pada berbagai variasi pembakaran seperti yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Tebal arang sampel termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Perbedaan ketebalan arang yang dihasilkan dapat disebabkan karena nilai kerapatan dimana kayu mahoni memiliki kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan mindi. Hal ini selaras dengan Ebner *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa perbedaan kerapatan juga dapat memengaruhi konduktivitas termal dan

reaksi keseluruhan terhadap api sehingga menyebabkan perbedaan ketebalan arang pada tiap jenis kayu yang dibakar. Penelitian Kymäläinen *et al.* (2022) menunjukkan bahwa kayu birch memiliki kerapatan yang lebih tinggi, tetapi variasi ketebalan lapisan arang yang terukur jauh lebih rendah dibandingkan pada kayu spruce yang kerapatannya lebih rendah. Jenis kayu serta kadar air awal sebelum dibakar juga diduga memengaruhi ketebalan arang yang terbentuk dimana kadar air awal kayu mindi lebih rendah dibandingkan kayu mahoni. Hal ini selaras dengan Kymäläinen *et al.* (2023) dan Zelinka *et al.* (2022) yang menjelaskan bahwa kompleksitas tebal arang yang terbentuk pada modifikasi *shou-sugi ban* juga dipengaruhi oleh ditentukan oleh sifat bahan baku seperti jenis kayu, kerapatan, kadar air, serta ukuran spesimen. Jenis kayu juga sangat mempengaruhi sifat fisik arang dimana kayu dengan kerapatan lebih tinggi menghasilkan lapisan arang yang lebih padat dan lebih halus (Kymäläinen *et al.* 2023). Metode *shou-sugi ban* banyak dipilih karena mampu memberikan perlindungan pada kayu, khususnya terhadap serangan mikroorganisme dan paparan sinar ultraviolet saat digunakan di luar ruangan. Efektivitas perlindungan ini sangat bergantung pada ketebalan lapisan arang yang terbentuk selama proses pembakaran (Zelinka *et al.* 2022).



Gambar 5 Kehilangan tebal sampel termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Pembentukan arang dan kehilangan tebal terjadi sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 4 dan 5. Perbedaan ketebalan arang antara sampel kontrol dan *shou-sugi ban* pada kayu mahoni maupun mindi cenderung nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap ketebalan arang kayu mahoni dan mindi karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,000 dan 0,002 ( $\leq 0,05$ ). Sementara itu, perbedaan ketebalan sampel berdasarkan kehilangan tebal antara sampel kontrol dan *shou-sugi ban* pada kayu mahoni maupun mindi juga cenderung nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap kehilangan tebal kayu mahoni dan mindi karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut, yakni 0,000 dan 0,041 ( $\leq 0,05$ ). Pembentukan

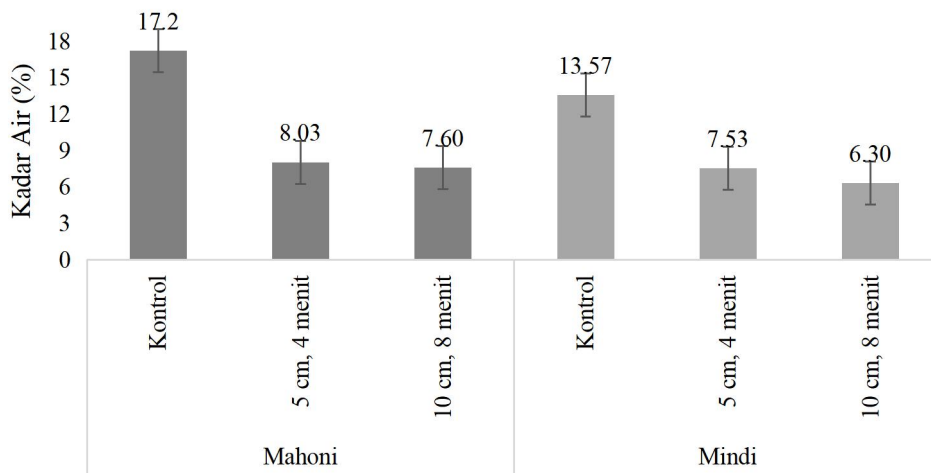
lapisan arang sekaligus terjadinya pengurangan tebal disebabkan karena paparan suhu yang tinggi dari api pada permukaan kayu akan menciptakan lapisan karbon yang berwarna hitam akibat pirolisis. Hal ini selaras dengan Ebner *et al.* (2019) yang menjelaskan bahwa proses pembentukan lapisan karbon dimulai pada suhu sekitar 270 °C, yaitu saat suhu penyalaan tercapai dan kayu mulai terbakar. Suhu di atas 400 °C menyebabkan terjadinya pembakaran dengan nyala api terbuka, di mana kayu menjadi hitam akibat dekomposisi eksotermik dan secara perlahan membentuk lapisan karbon. Pirolisis termasuk kedalam salah satu bentuk termolisis dan merupakan proses yang terlibat dalam pembentukan arang pada kayu (Machová *et al.* 2021). Menurut Browne (1958), lapisan arang pada sepotong kayu yang mengalami pirolisis berada pada kisaran suhu sekitar 280-350 °C, bertepatan dengan garis di mana reaksi berubah dari endotermik menjadi eksotermik. Semakin jauh proses pirolisis kayu berlangsung, struktur pori dan komposisinya akan semakin bervariasi. Pada tahap ini dekomposisi hemiselulosa dan selulosa dengan cepat meningkatkan kandungan karbon tetap serta ketika struktur kristalin mikrofibril telah sepenuhnya terdegradasi, kayu telah berubah menjadi arang (Kymäläinen *et al.* 2023).

Variasi pembakaran memberikan perbedaan ketebalan arang yang terjadi secara signifikan terhadap sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni maupun mindi seperti yang disajikan pada Gambar 4. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi yang menunjukkan bahwa sampel dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang berbeda sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketebalan arang yang terbentuk pada kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Sementara itu, variasi pembakaran memberikan perbedaan kehilangan tebal sampel yang terjadi secara signifikan terhadap sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni, namun tidak signifikan terhadap kayu mindi seperti yang disajikan pada Gambar 5. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran yang menunjukkan bahwa sampel kayu mahoni dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada *subset* yang berbeda, sedangkan pada kayu mindi berada pada *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kehilangan tebal sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni, namun tidak signifikan terhadap kehilangan sampel *shou-sugi ban* kayu mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan tebal arang yang terbentuk serta kehilangan tebal yang lebih besar pada sampel dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit pada kedua jenis kayu tersebut disebabkan karena lama waktu pembakaran yang dilakukan. Semakin lama waktu pembakaran yang dilakukan, maka proses pirolisis yang terjadi akan semakin lama sehingga lapisan arang yang terbentuk pun semakin banyak atau tebal. Hal ini selaras dengan pernyataan Fahrussiam *et al.* (2022) yang menjelaskan bahwa semakin lama durasi pembakaran, maka lapisan arang yang terbentuk akan semakin tebal. Penelitian Fahrussiam *et al.* (2022), menunjukkan bahwa tebal arang yang dihasilkan selama proses pembakaran selama 30 detik menghasilkan tebal arang sekitar 0,417 mm dan pembakaran selama 20 detik sebesar 0,362 mm untuk luas yang sama yakni 70 cm<sup>2</sup>. Variasi tebal yang dihasilkan tergantung

dengan metode pembakaran, lama pembakaran, kadar air kayu, dan jenis kayu yang digunakan (Zelinka *et al.* 2022). Sejalan dengan hal tersebut, Kymäläinen *et al.* (2022) juga menjelaskan bahwa ketebalan lapisan arang pada modifikasi *shou-sugi ban* dapat ditingkatkan dengan memperpanjang waktu modifikasi, namun retakan pada arang yang terjadi bersamaan dapat memengaruhi kestabilan permukaan saat digunakan. Selain itu, jarak pembakaran yang lebih dekat memungkinkan suhu yang dipaparkan pada permukaan kayu semakin tinggi yang diduga juga dapat berpengaruh pada ketebalan arang yang dihasilkan. Hal ini selaras dengan Ebner *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa pada dasarnya suhu yang lebih tinggi menghasilkan lapisan arang yang lebih tebal, meskipun suhu yang lebih tinggi tidak selalu memberikan perbedaan ketebalan lapisan arang. Hal ini dapat dijelaskan oleh intensitas atau lama waktu pembakaran. Variasi pembakaran yang memberikan hasil arang dengan kualitas yang baik yakni kayu mahoni dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit dengan tebal arang sebesar 0,385 cm. Lapisan arang setebal 0,3-0,5 cm melindungi kayu dari pengaruh lingkungan (Ebner *et al.* 2019). Struktur arang mempengaruhi kualitas permukaan yang terkarbonisasi dalam hal daya tahan saat digunakan, karena tingkat keteraturan yang lebih tinggi diduga dapat meningkatkan stabilitas terhadap keausan akibat proses fotokimia (Yoo *et al.* 2018).

### Kadar Air

Kadar air berhubungan dengan sifat higroskopis yang dimiliki oleh kayu. Higroskopisitas yang tinggi mengindikasikan bahwa kayu lebih mudah dalam menyerap air yang akan memengaruhi stabilitas dimensi, kekuatan dan keawetan kayu. Kadar air kering udara kayu kontrol mahoni sebesar 17,2% lebih tinggi dibandingkan kadar air kayu mindi sebesar 13,57% seperti yang disajikan pada Gambar 6. Nilai kadar air kering udara kedua jenis kayu tersebut pada penelitian ini mirip dengan hasil penelitian Alokabel *et al.* (2017) yakni sebesar 18,73% untuk kayu mahoni, dan Wulandari *et al.* (2023) yakni sebesar 14,11% pada kayu mindi.



Gambar 6 Kadar air sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Secara umum, kayu-kayu di Indonesia yang telah mencapai kondisi kering udara memiliki kadar air berkisar antara 12% hingga 18%, dengan rata-rata sekitar 15% (Sutandar *et al.* 2021). Perbedaan kadar air antara kedua kayu ini dapat disebabkan karena perbedaan struktur anatomi serta kandungan komponen kimia penyusun kayu yang berbeda antara kayu mahoni dengan mindi. Hal ini selaras dengan Burhanuddin *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa perbedaan nilai kadar air pada setiap jenis kayu dapat disebabkan oleh variasi struktur anatomi, komposisi senyawa penyusun kayu, serta tingkat kelembapan lingkungan. Di dalam sel kayu, terdapat air dan senyawa kimia yang berkontribusi terhadap kadar air tersebut. Saat kayu mengalami proses pengeringan, air akan keluar dari rongga dan dinding sel, menyisakan senyawa ekstraktif. Menurut Haygreen dan Bowyer (2007), senyawa kimia berupa zat ekstraktif yang mengendap di dinding sel kayu dapat menggantikan posisi air dalam membentuk ikatan dengan molekul selulosa dan hemiselulosa. Jumlah air dalam kayu juga dipengaruhi oleh besarnya volume rongga sel yang tidak terisi oleh dinding sel maupun zat ekstraktif.

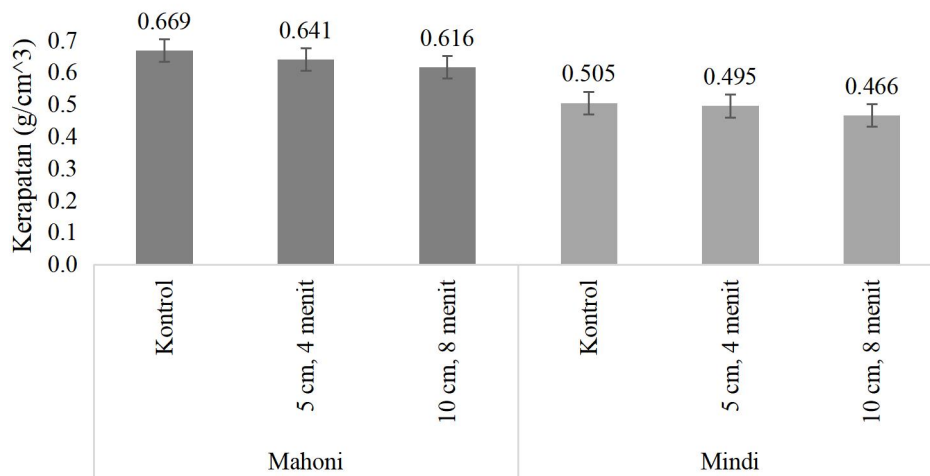
Penurunan kadar air terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu cenderung nyata dan lebih rendah dibanding kadar air sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 6. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap kadar air kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi  $0,000 (\leq 0,05)$ . Penurunan kadar air tersebut disebabkan karena pembakaran pada permukaan kayu akan menciptakan lapisan arang. Pembentukan arang ini akan mengurangi jumlah gugus -OH pada kayu karena terjadi degradasi bagian amorf dan meningkatnya kristalinitas selulosa sehingga kemampuan kayu dalam menyerap air menurun. Bagian amorf pada kayu ini memiliki gugus-gugus -OH yang mampu berikatan dengan molekul air yang membuat kayu mudah untuk menyerap air, sedangkan bagian kristalin tidak dapat dimasuki molekul air. Menurut Saenuddin *et al.* (2020), struktur amorf cenderung lebih mudah menyerap dan menahan air dibandingkan struktur kristalin. Oleh karena itu, pada kadar air yang rendah biasanya disebabkan oleh dominasi struktur kristalin. Hal tersebut selaras dengan Kymäläinen *et al.* (2017) yang menjelaskan bahwa sifat hidrofobik permukaan kayu juga dipengaruhi oleh degradasi hemiselulosa dan daerah amorf selulosa, serta meningkatnya kristalinitas selulosa. Penelitian Cermak *et al.* (2019) menunjukkan bahwa proses karbonisasi pada permukaan kayu saat pembakaran dapat mengurangi kadar air keseimbangan hingga 20%. Penurunan ini terjadi akibat berkurangnya gugus hidroksil (-OH) yang berperan dalam pengikatan molekul air pada kayu.

Variasi pembakaran memberikan perbedaan penurunan nilai kadar air yang terjadi meskipun tidak signifikan pada sampel *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 6. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi yang menunjukkan bahwa sampel dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kadar air kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan nilai kadar air sampel *shou-sugi ban* dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit yang lebih rendah

dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit disebabkan karena pengaruh lama waktu pembakaran berhubungan langsung dengan peningkatan kristalinitas selulosa pada kayu. Intensitas pembakaran yang lebih tinggi akan menyebabkan proses pirolisis berlangsung lebih lama sehingga membuat proporsi daerah kristalin pada selulosa kayu yang bersifat hidrofobik semakin banyak. Peningkatan kristalinitas ini menyebabkan air semakin sulit untuk masuk atau terserap ke dalam kayu. Hal tersebut selaras dengan Šeda *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa pirolisis menyebabkan kristalinitas meningkat. Hidrofobisitas kayu yang dipanaskan menjadi lebih tinggi dapat dijelaskan oleh degradasi daerah amorf dan peningkatan kristalinitas selulosa karena daerah amorf menyerap air lebih banyak dibandingkan selulosa kristalin. Stabilitas dimensi kayu akan meningkat akibat perubahan sifat permukaannya yang menjadi lebih hidrofobik. Kadar air kayu akan semakin menurun seiring bertambahnya suhu selama proses perlakuan panas (Widyorini *et al.* 2014). Lapisan arang bermanfaat untuk melindungi permukaan kayu dari kelembapan dan serangan jamur, mencegah udara masuk ke bagian dalam penampang, serta meningkatkan ketahanan kayu terhadap pembakaran (Špilák 2018) dan (Ebner *et al.* 2019).

### Kerapatan

Kerapatan kayu berhubungan erat terhadap kekuatan mekanis serta daya serap air kayu. Semakin tinggi kerapatannya, semakin besar pula kekuatan kayu, dan sebaliknya. Kerapatan mencerminkan kemampuan suatu bahan dalam menahan beban mekanis (Wulandari *et al.* 2022). Menurut Haygreen dan Bowyer (2007), perbedaan kerapatan kayu mencerminkan variasi kemampuan dinding sel kayu dalam mengikat air. Kerapatan kayu kontrol mahoni sebesar  $0,669 \text{ g/cm}^3$  lebih tinggi dibandingkan kadar air kayu mindi sebesar  $0,505 \text{ g/cm}^3$  seperti yang disajikan pada Gambar 7. Nilai kerapatan kedua jenis kayu tersebut pada penelitian ini mirip dengan hasil penelitian Slamet *et al.* (2023) yakni sebesar  $0,643 \text{ g/cm}^3$  untuk kayu mahoni, dan Herawati *et al.* (2021) yakni sebesar  $0,520 \text{ g/cm}^3$  pada kayu mindi.



Gambar 7 Kerapatan sampel kontrol dan termodifikasi shou-sugi ban pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Kerapatan sampel kontrol kayu mahoni yang lebih tinggi dibanding mindi disebabkan karena dinding sel pada kayu mahoni lebih tebal. Penelitian Nawawi dan Widyani (2010) menunjukkan bahwa kayu mahoni memiliki tebal dinding sel 2,90  $\mu\text{m}$ , sedangkan Praptoyo (2010) menemukan bahwa tebal dinding sel kayu mindi sebesar 2,50  $\mu\text{m}$ . Selain itu, perbedaan jenis dan kandungan zat ekstraktif pada kedua jenis kayu tersebut juga memengaruhi nilai kerapatan yang didapat. Hal ini selaras dengan Iskandar (2017) yang menjelaskan bahwa kerapatan yang tinggi disebabkan oleh dominasi sel-sel yang memiliki dinding tebal dan rongga sel yang kecil. Menurut Kollmann dan Cote (1968), kerapatan kayu dipengaruhi oleh struktur seluler kayu serta kandungan zat ekstraktif. Struktur sel yang dimaksud mencakup proporsi jenis-jenis sel, terutama terkait dengan ketebalan dinding sel. Kayu dengan dinding sel yang lebih tebal cenderung memiliki kerapatan lebih tinggi dibandingkan dengan kayu yang berdinding tipis. Semakin tinggi kandungan zat ekstraktif kayu dalam dinding sel, maka dinding sel tersebut akan semakin tebal (Haygreen dan Bowyer 2007). Kadar air mahoni yang lebih tinggi juga menyebabkan kerapatan yang dihasilkan juga lebih tinggi dibandingkan kayu mindi. Hal ini selaras dengan Supriadi *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa kayu dengan kerapatan lebih tinggi umumnya memiliki kadar air yang lebih besar.

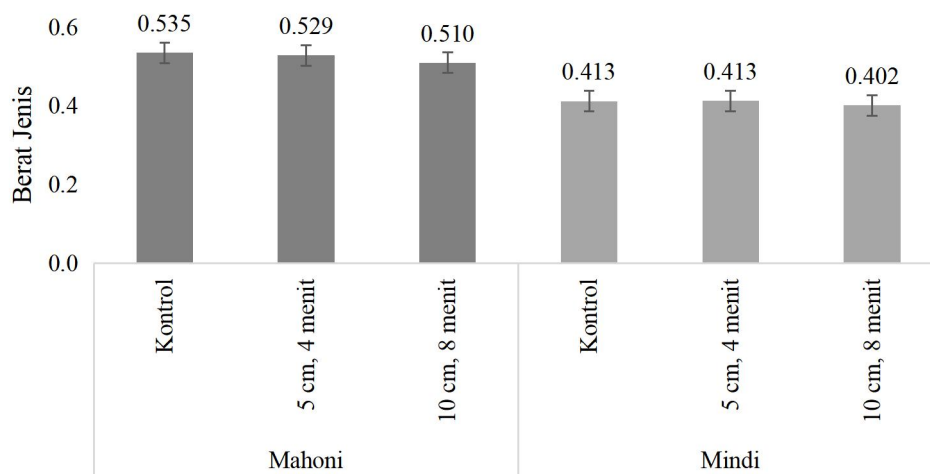
Penurunan kerapatan terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi yang lebih rendah dibanding kerapatan sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 7. Perbedaan nilai kerapatan antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni dan mindi cenderung tidak nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang tidak nyata terhadap kerapatan kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,232 dan 0,134 ( $\geq 0,05$ ). Penurunan kerapatan sampel kayu perlakuan modifikasi *shou-sugi ban* pada kedua jenis kayu disebabkan karena terjadinya degradasi komponen penyusun kayu terutama selulosa dan hemiselulosa selama proses pemkarena pembakaran yang ditandai dengan terbentuknya arang. Hasil ini selaras dengan Ebner *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa lapisan arang menyebabkan kerapatan dan volume yang menurun, serta tidak menunjukkan pembengkakan. Penurunan kerapatan akibat pembakaran satu sisi permukaan (*shou-sugi ban*) berkaitan dengan berbagai reaksi degradasi termal. Hemiselulosa terurai pada suhu 250-300 °C, diikuti oleh lignin dan selulosa di atas 280 °C. Pada sekitar 300 °C, terjadi depolimerisasi selulosa, pembentukan senyawa volatil, oksidasi, dan arang. Kenaikan suhu menyebabkan penurunan polimerisasi selulosa dan peningkatan kristalinitas, kemungkinan karena degradasi molekul yang kurang teratur. Degradasi lanjutan selulosa dan lignin terjadi sekitar 360 °C, dan lignin tersisa terus terurai hingga 400 °C (Šeda *et al.* 2021). Penurunan kerapatan setelah modifikasi *weathering* dapat dikaitkan dengan fase-fase degradasi kayu (Hererra *et al.* 2018).

Variasi pembakaran memberikan perbedaan penurunan kerapatan yang terjadi meskipun tidak signifikan pada sampel *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 7. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi yang menunjukkan bahwa sampel dengan variasi

jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kerapatan kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan nilai kerapatan sampel *shou-sugi ban* dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit yang lebih rendah dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit disebabkan karena pengaruh lama waktu pembakaran yang dilakukan. Waktu pembakaran yang lebih lama menyebabkan semakin banyak komponen kayu yang terdegradasi sehingga kerapatan kayu juga semakin menurun. Hal ini selaras dengan Seda *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa kerapatan rata-rata dari spesimen *shou-sugi ban* cenderung mengalami penurunan sesuai dengan waktu–suhu yang digunakan. Semakin lama waktu dan parahnya pembakaran, kerapatan menurun sekitar 15,5 hingga 33,5%. Penelitian Seda *et al.* (2021) juga menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama memengaruhi kerapatan hingga kedalaman 4 mm. Seiring waktu pemanasan yang lebih lama, kerapatan terpengaruh hingga kedalaman 6 mm di bawah permukaan spesimen.

### Berat Jenis

Berat jenis menjadi salah satu sifat fisik dasar kayu yang sangat penting dan sering dijadikan indikator untuk menilai kualitas kayu (Marsoem *et al.* 2014). Umumnya, semakin besar nilai berat jenis, semakin tinggi pula kekuatan kayu tersebut (Haygreen dan Bowyer 2007). Berat jenis kayu kontrol mahoni sebesar 0,535 lebih tinggi dibandingkan berat jenis kayu mindi sebesar 0,413 seperti yang disajikan pada Gambar 8. Nilai berat jenis kedua kayu tersebut pada penelitian ini mirip dengan hasil penelitian Alokabel *et al.* (2017) yakni sebesar 0,540 untuk kayu mahoni, dan Ma'aruf (2023) yakni sebesar 0,420 untuk kayu mindi.



Gambar 8 Berat jenis sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Nilai berat jenis kayu mahoni yang lebih tinggi dibandingkan kayu mindi disebabkan karena perbedaan struktur anatomi seperti tebal dinding sel, ukuran lumen serta kandungan kimia yang terdapat pada komponen penyusun kayu kedua jenis kayu tersebut seperti zat ekstraktif. Penelitian Naelufar (2014) menunjukkan bahwa kayu teras mahoni memiliki kadar zat ekstraktif sebesar 2,94%, sedangkan

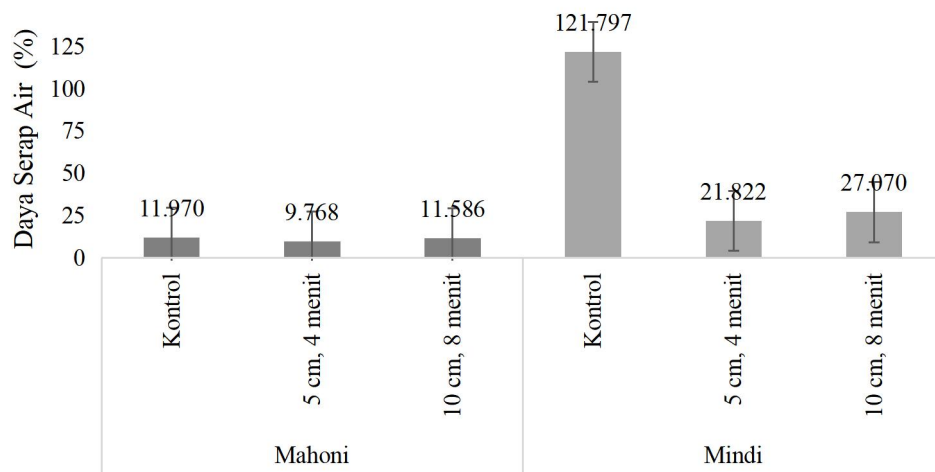
kadar ekstraktif kayu teras mindi sebesar 0,7% yang diteliti oleh Hadiyanto (2013). Hal ini selaras dengan Haygreen dan Bowyer (2007) yang menjelaskan bahwa kandungan bahan ekstraktif dan senyawa organik dalam sel kayu memengaruhi berat jenisnya. Semakin tinggi kandungan zat ekstraktif dan senyawa organik, maka semakin besar pula berat jenis kayu (Haygreen dan Bowyer 2007). Variasi berat jenis kayu dipengaruhi oleh ukuran sel, ketebalan dinding sel, serta proporsi dan keragaman jumlah sel yang menyusunnya (Burhanuddin *et al.* 2016).

Penurunan berat jenis terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi yang lebih rendah dibanding berat jenis sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 8. Perbedaan nilai berat jenis antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni dan mindi cenderung tidak nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang tidak nyata terhadap berat jenis kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,589 dan 0,651 ( $\geq 0,05$ ). Penurunan berat jenis sampel kayu perlakuan modifikasi *shou-sugi ban* pada kedua jenis kayu disebabkan karena terjadinya berkurangnya kadar zat ekstraktif karena degradasi zat ekstraktif volatil dan senyawa organik serta diikuti dengan degradasi komponen selulosa dan hemiselulosa di dalam kayu. Hal tersebut selaras dengan Jankowska dan Kozakiewicz (2016) yang menjelaskan bahwa *artificial weathering* berhubungan termasuk kedalam modifikasi termal yang menyebabkan proses depolimerisasi kimiawi kayu, degradasi ekstraktif kayu, pelindian senyawa ekstraktif dari dinding sel, serta hidrolisis parsial hemiselulosa dan selulosa pada permukaan sampel, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kerapatan dan berat jenis kayu.

Variasi pembakaran memberikan perbedaan penurunan berat jenis yang terjadi meskipun tidak signifikan pada sampel *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 8. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi yang menunjukkan bahwa sampel dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap berat jenis kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan nilai berat jenis sampel *shou-sugi ban* dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit yang lebih rendah dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit disebabkan karena pengaruh lama waktu pembakaran yang dilakukan. Pembakaran yang lebih lama akan menyebabkan semakin banyak zat ekstraktif dan senyawa organik yang terdegradasi sehingga membuat berat jenis kayu juga menurun. Kandungan relatif ekstraktif menurun seiring dengan peningkatan suhu akibat degradasinya (Dúbravská *et al.* 2024). Secara umum, volume dan massa kayu mulai berkurang sebagai akibat dari penguapan air dari kayu (pada sekitar 100 °C). Kehilangan massa lebih lanjut berkaitan dengan dekomposisi termal dari tiga komponen polimer utama (hemiselulosa, selulosa, dan lignin) serta ekstraktif. Komponen ini bersama-sama membentuk campuran senyawa mudah menguap dalam rentang suhu (150-480) °C (Žigon dan Pavlič 2023).

### Daya Serap Air

Ketahanan kayu modifikasi *shou-sugi ban* salah satunya ditentukan melalui daya serap air. Kayu akan semakin tahan apabila daya serap airnya rendah. (Soytürk *et al.* 2023). Daya serap air kayu kontrol mahoni sebesar 11,970 % lebih rendah dibandingkan daya serap air kayu mindi sebesar 121,797 % seperti yang disajikan pada Gambar 9. Nilai daya serap air kayu mahoni yang lebih rendah dibandingkan kayu mindi disebabkan karena perbedaan kerapatan kayu mahoni yang lebih tinggi dibandingkan kayu mindi. Hal ini selaras dengan Haygreen dan Bowyer (2007) yang menyatakan semakin tinggi kerapatan kayu, maka semakin rendah kemampuan kayu dalam menyerap air.



Gambar 9 Daya serap air sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Penurunan daya serap air terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi yang lebih rendah dibanding daya serap air sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 9. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap daya serap kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,044 dan 0,000 ( $\leq 0,05$ ). Penurunan daya serap air pada sampel modifikasi *shou-sugi ban* kedua jenis kayu ini disebabkan oleh sifat hidrofobitas pada arang yang terbentuk dari proses pembakaran yang sekaligus mengurangi jumlah gugus hidroksil. Hal ini selaras dengan Kymäläinen *et al.* (2017) yang menjelaskan bahwa arang yang dihasilkan selama pembakaran memiliki sifat hidrofobik, yaitu kemampuan menyerap air yang rendah. Sifat hidrofobik ini muncul karena komponen reaktif dalam kayu, seperti hemiselulosa dan bagian amorf dari selulosa, mengalami degradasi selama proses pirolisis. Sementara itu, Fahrussiam *et al.* (2023) juga menambahkan bahwa reaksi kimia yang terjadi saat pembakaran turut mengurangi jumlah gugus hidroksil, yang berperan dalam penyerapan air (Fahrussiam *et al.* 2023). Selaras dengan hal tersebut, Kymäläinen *et al.* (2018) juga melaporkan bahwa penurunan gugus hidroksil pada permukaan kayu yang dibakar berkaitan dengan berkurangnya kemampuan kayu menyerap uap air. Degradasi karbohidrat pada kayu yang

dibakar menjadi salah satu alasan penting berkurangnya penyerapan air, karena jumlah gugus OH yang bersifat hidrofilik ikut berkurang (Soytürk *et al.* 2023). Selain itu, peningkatan kristalinitas selulosa, pelunakan lignin serta penguapan zat ekstraktif yang bersifat *volatile* akibat suhu tinggi pada kayu juga dapat menyebabkan permukaan kayu menjadi bersifat hidrofobik sehingga sulit menyerap air. Hal tersebut dijelaskan oleh Kymäläinen *et al.* (2018) yang menjelaskan bahwa pelembutan lignin dalam proses degradasi termal mungkin memiliki potensi untuk membentuk permukaan hidrofobik pada kayu yang dimodifikasi secara termal. Zat ekstraktif terutama yang bersifat non-polar akan menguap selama proses pembakaran dan dapat mengembun di permukaan kayu dan selanjutnya mendukung sifat hidrofobik, yang menyebabkan plastisasi pada permukaan kayu (Kymäläinen *et al.* 2015). Penurunan penyerapan air kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya jumlah gugus hidroksil (-OH) pada selulosa dan hemiselulosa akibat perlakuan suhu tinggi. Selain itu, menurunnya aksesibilitas molekul air terhadap gugus hidroksil selulosa juga diakibatkan karena peningkatan kristalinitas selulosa dan pembentukan ikatan silang pada lignin (Šeda *et al.* 2021).

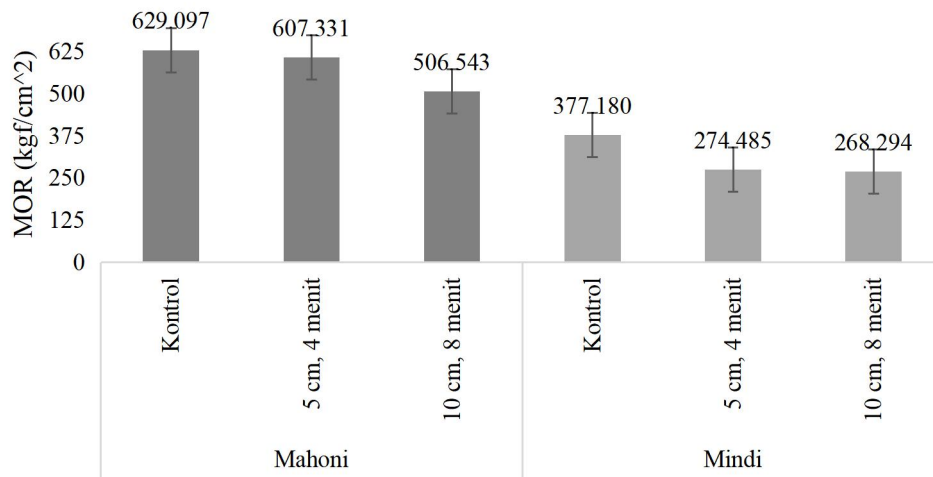
Variasi pembakaran memberikan perbedaan nilai daya serap air permukaan yang terjadi terhadap sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni dan mindi seperti yang disajikan pada Gambar 9. Hasil analisis uji lanjut *tukey* pada setiap variasi pembakaran baik pada kayu mahoni dan mindi menunjukkan bahwa sampel dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada satu *subset* yang sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya serap air kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Hasil yang berbeda ditemui pada uji *duncan* pada setiap variasi pembakaran yang menunjukkan bahwa sampel kayu mahoni dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada *subset* yang berbeda, sedangkan pada kayu mindi berada pada *subset* sama sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya serap air kayu mahoni, namun tidak signifikan terhadap kekasaran permukaan kayu mindi pada tingkat kepercayaan 95%. Daya serap air pada kedua jenis kayu dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit lebih rendah dibandingkan jarak bakar 10 cm selama 8 menit. Peningkatan daya serap air tersebut disebabkan karena intensitas pembakaran yang lebih lama akan menyebabkan kayu mengalami retakan atau *cracking* yang berlebih. Retakan yang berlebih ini memiliki porositas yang tinggi sehingga memungkinkan air untuk masuk ke dalam kayu dengan lebih mudah.

Hal tersebut selaras dengan Soytürk *et al.* (2023) yang menjelaskan bahwa pengaturan suhu dan waktu yang tepat sangat diperlukan dalam proses pembakaran permukaan. Perlakuan pembakaran yang sesuai dapat memengaruhi lebih banyak karbohidrat, sehingga mengurangi penyerapan air. Suhu dan durasi yang terlalu tinggi justru dapat menyebabkan retakan pada permukaan, yang kemudian memungkinkan air masuk melalui celah-celah tersebut. Penelitian Kymäläinen *et al.* 2018 menunjukkan bahwa retakan yang terbentuk pada permukaan arang selama proses pembakaran menyebabkan permukaan kayu menjadi lebih berpori, sehingga tidak mampu menghalangi masuknya air ke dalam kayu. Lapisan arang di permukaan bersifat hidrofobik, saling terikat, dan aromatik,

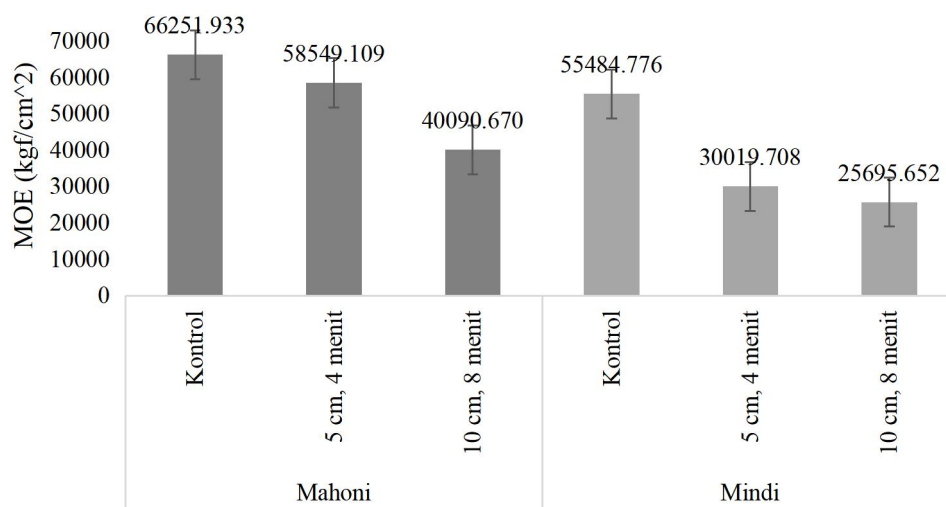
tetapi juga berpori dan rapuh. Pembakaran yang intensif yakni lebih dari 400 °C menyebabkan retakan yang parah dan peningkatan penyerapan air secara kapiler (Šeda *et al.* 2021). Kayu dengan retak yang berlebih akibat *weathering* mampu menyerap lebih banyak air (Kymäläinen *et al.* 2022).

### Kekakuan dan Kelenturan

Modulus elastisitas (MOE) dan kekakuan (MOR) kayu termasuk kedalam dua parameter utama yang sering digunakan untuk memperkirakan sifat-sifat mekanik lainnya dari kayu, seperti kekuatan tekan, tarik, dan geser (Awaludin dan Wusqo 2020). Modulus Elastisitas (MOE) merepresentasikan sejauh mana material mampu menahan pembengkokan, yang memiliki keterkaitan langsung dengan tingkat kekakuannya (Yoresta 2015). Menurut Mamlouk dan Zaniewski (2006), MOE berkaitan dengan kemiringan bagian linier dari kurva tegangan-regangan, sementara MOR mencerminkan kekuatan serat yang tercapai saat benda uji menerima beban maksimum sebelum mengalami kegagalan, yang menunjukkan nilai kekuatan tertinggi dari material tersebut.



Gambar 10 Kekakuan (MOR) sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi



Gambar 11 Kelenturan (MOE) sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Nilai MOR dan MOE kayu kontrol mahoni secara berturut-turut yakni sebesar 629,097 kgf/cm<sup>2</sup> dan 66251,933 kgf/cm<sup>2</sup> lebih tinggi dibandingkan kayu mindi yang sebesar 377,180 kgf/cm<sup>2</sup> dan 55484,776 kgf/cm<sup>2</sup> seperti yang disajikan pada Gambar 10 dan 11. Nilai MOR kayu mahoni tersebut tidak jauh berbeda dengan Martawijaya *et al.* (2005) dalam Listyanto *et al.* (2016) yang menyebutkan bahwa kayu mahoni memiliki nilai MOR sebesar 623 kgf/cm<sup>2</sup>, namun berbeda untuk nilai MOE dibandingkan dengan penelitian Slamet *et al.* (2023) yang menunjukkan nilai MOE kayu mahoni sebesar 593474 kgf/cm<sup>2</sup>. Sementara itu, hasil nilai MOE dan MOR pada kayu mindi cenderung berbeda dibandingkan dengan penelitian Wulandari *et al.* (2023) yang menunjukkan nilai MOE dan MOR kayu mindi secara berturut-turut yakni sebesar 762,22 kgf/cm<sup>2</sup> dan 62343,40 kgf/cm<sup>2</sup>. Perbedaan hasil dari beberapa penelitian tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi sampel sebelum dilakukan pengujian seperti ukuran, kadar air, umur kayu serta lingkaran tumbuh serta faktor teknis pengujian yang dilakukan seperti metode serta kecepatan pembebanan yang dilakukan. Hal tersebut selaras dengan Mihailovic *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa nilai MOE dan MOR kayu dipengaruhi oleh banyak faktor seperti jenis, asal, laju pertumbuhan, dan umur pohon, keberadaan cacat seperti mata kayu, kadar air, dan kerapatan kayu. Selain itu, sifat mekanis kayu tergantung pada metode pengujian. Salah satu faktor yang secara signifikan memengaruhi sifat mekanis kayu yang ditentukan melalui metode uji destruktif konvensional adalah laju pembebanan. Nilai MOE dan MOR kayu mahoni yang lebih besar dibandingkan dengan kayu mindi disebabkan karena berat jenis dan kerapatan yang dimiliki juga lebih tinggi dibandingkan kayu mindi. Hal ini selaras dengan penjelasan Wahyudi *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa kayu dengan berat jenis (BJ) yang tinggi cenderung memiliki nilai MOE dan MOR yang lebih besar dibandingkan dengan kayu yang berat jenisnya rendah. Kerapatan yang lebih tinggi pada kayu juga berhubungan dengan nilai MOE dan MOR yang lebih besar. Kerapatan tinggi menunjukkan

dinding sel yang lebih tebal, sehingga kayu tersebut cenderung memiliki kekuatan yang lebih besar (Artha dan Prihatmaji 2019).

Penurunan nilai MOE dan MOR terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi yang lebih rendah dibanding sampel kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 10 dan 11. Perbedaan nilai MOE antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni dan mindi cenderung nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap MOE kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,003 dan 0,011 ( $\leq 0,05$ ). Sementara itu, perbedaan nilai MOR antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni dan mindi cenderung tidak nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) pada kedua jenis kayu yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang tidak nyata terhadap MOR kayu mahoni dan mindi pada tingkat kepercayaan 95% karena memiliki nilai signifikansi secara berturut-turut yakni 0,094 dan 0,338 ( $\geq 0,05$ ).

Penurunan nilai MOE dan MOR sampel kayu perlakuan modifikasi *shou-sugi ban* pada kedua jenis kayu disebabkan karena adanya degradasi komponen penyusun sel kayu akibat pembakaran, terutama selulosa dan hemiselulosa pada dinding sel sehingga berhubungan juga dengan terjadinya penurunan kerapatan kayu. Hal tersebut selaras dengan Fahrussiam *et al.* (2024) yang menjelaskan bahwa selama proses pemanasan, kandungan hemiselulosa mengalami degradasi yang tinggi serta terjadi proses kristalisasi pada bagian amorf selulosa, yang menyebabkan kayu menjadi rapuh dan menurunkan sifat mekanisnya (Fahrussiam *et al.* 2024). Penelitian Nasir *et al.* (2021) menunjukkan bahwa MOE dan MOR kayu menurun seiring bertambahnya durasi *weathering*. Paparan sinar ultraviolet memengaruhi struktur mikro dan komposisi kimia kayu, terutama menyebabkan degradasi lignin. Suhu tinggi mempercepat degradasi ini, dan *weathering* juga dapat menyebabkan kehilangan massa kayu (Nasir *et al.* 2021). Penurunan nilai MOR dapat dikaitkan dengan penurunan kerapatan (Herrera *et al.* 2018). Penelitian Fahrussiam *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kehilangan berat lebih dari 16% akibat proses pemanasan dapat secara signifikan menurunkan nilai MOE dan MOR. Menurut Aquino *et al.* (2021), *artificial weathering* menyebabkan penurunan kekuatan pada semua jenis kayu yang diteliti, dan efek ini terutama dipengaruhi oleh kerapatan kayu. Penurunan nilai MoE dan MoR pada kayu berkaitan dengan hilangnya hemiselulosa pada kayu yang dimodifikasi, yang berperan dalam proses pertukaran air sambil mempertahankan struktur kayu. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengontrol suhu secara hati-hati dan membatasi kadar oksigen (Ebner *et al.* 2023).

Variasi pembakaran memberikan perbedaan penurunan nilai MOE yang terjadi secara signifikan pada sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni, namun tidak signifikan pada kayu mindi, sedangkan pada nilai MOR tidak signifikan kedua jenis kayu pada tingkat kepercayaan 95%. Perbedaan nilai MOE dan MOR sampel *shou-sugi ban* dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit yang lebih rendah dibandingkan jarak bakar 5 cm selama 4 menit disebabkan karena pengaruh lama waktu pembakaran yang dilakukan. Hasil tersebut selaras dengan penelitian Fahrussiam *et al.* (2024) yang menunjukkan bahwa pembakaran selama 40 detik pada metode *yakisugi* menghasilkan nilai MoE dan MoR tertinggi, pembakaran

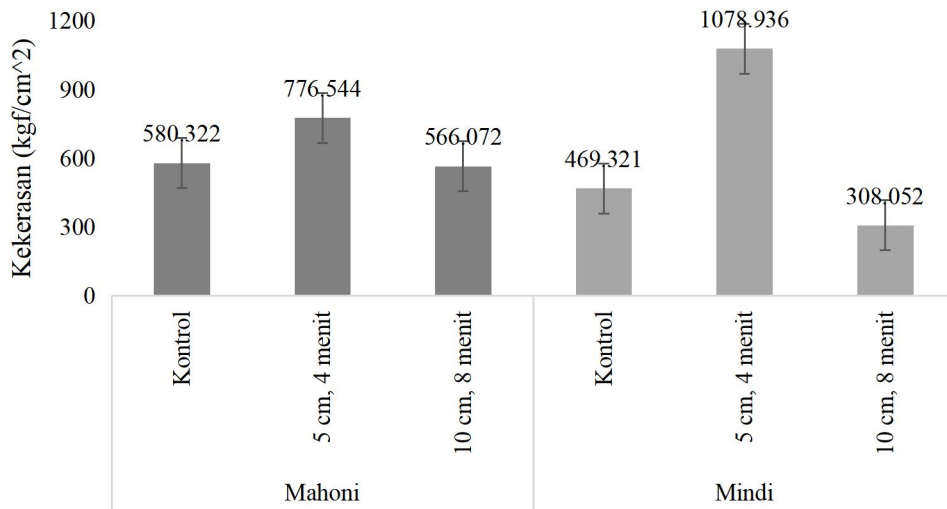
selama 60 detik menurunkan nilai MoE dan MoR secara signifikan, menunjukkan bahwa durasi pembakaran yang terlalu lama berdampak buruk pada kekuatan mekanis kayu (Fahrussiam *et al.* 2024). Pembakaran yang lebih lama menyebabkan komponen utama penyusun sel kayu seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin yang terdegradasi semakin banyak. Degradasi komponen kimia kayu tersebut akan sifat mekanis kayu juga menurun. Hal tersebut selaras dengan Martha *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa kekurangan dari perlakuan panas adalah penurunan sifat mekanis kayu seiring meningkatnya suhu dan lamanya waktu pemanasan. Menurut Nhadila *et al.* (2020), nilai MOR dan MOE kayu mengalami perubahan ketika dimodifikasi secara termal, tergantung pada suhu dan lamanya perlakuan yaitu, semakin tinggi suhu selama perlakuan, semakin besar penurunan kekuatannya. Secara lebih spesifik Fahrussiam *et al.* (2023) menjelaskan bahwa metode perlakuan panas, termasuk teknik *yakisugi*, terbukti memberikan dampak signifikan terhadap sifat mekanis kayu. Kayu yang telah mengalami pemanasan cenderung menjadi rapuh serta mengalami penurunan kekuatan tarik dan tekan sebesar 10–30%. Hal tersebut secara kimawi disebabkan oleh degradasi kompleks lignin-polisakarida akibat asam organik yang dihasilkan dari hemiselulosa selama proses pembakaran. Penggunaan perlakuan panas pada material yang akan menerima beban perlu dilakukan dengan pertimbangan yang cermat (Fahrussiam *et al.* 2023). Menurut Herrerra *et al.* (2018), modifikasi termal menurunkan MOR kayu hingga 50%, namun tetap memenuhi syarat untuk aplikasi non-struktural. Kayu termodifikasi lebih stabil terhadap *weathering*, dengan penurunan MOR yang lebih kecil akibat resistensi lebih tinggi terhadap degradasi kimia dan mikrostruktur.

### **Kekerasan**

Tingkat kekerasan kayu merupakan aspek penting yang dipertimbangkan dalam penggunaannya untuk berbagai produk, seperti *cladding*, *decking*, furnitur taman, maupun produk lain yang tidak menuntut ketahanan mekanis tinggi, karena tidak digunakan untuk tujuan struktural (Karlinasari *et al.* 2018). Kekerasan kontrol mahoni sebesar 580,322 kgf/cm<sup>2</sup> lebih tinggi dibandingkan kayu mindi yang sebesar 469,321 kgf/cm<sup>2</sup> seperti yang disajikan pada Gambar 12. Nilai kekerasan mahoni pada penelitian ini mirip dengan hasil penelitian Asikin (2010) yakni sebesar 526 kgf/cm<sup>2</sup> sedangkan untuk kayu mindi berbeda dengan penelitian Pratiwi (2014) yakni sebesar 290 kgf/cm<sup>2</sup>. Variasi kekerasan kayu berkaitan dengan kerapatan atau berat jenisnya, semakin besar berat jenis kayu, maka semakin tinggi pula tingkat kekerasannya (Andala *et al.* 2023)

Perubahan kekerasan terjadi pada sampel perlakuan *shou-sugi ban* kedua jenis kayu baik mahoni dan mindi. Kekerasan sampel kontrol kedua jenis kayu lebih rendah dibandingkan dengan sampel perlakuan dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit, namun lebih tinggi apabila dibandingkan dengan sampel perlakuan jarak bakar 10 cm selama 8 menit. Perbedaan nilai kekerasan antara sampel kontrol dan perlakuan pada kayu mahoni cenderung tidak nyata, sedangkan pada kayu mindi nyata. Hal ini didukung oleh hasil analisis varians (ANOVA) yang menunjukkan bahwa faktor pembakaran memberikan pengaruh yang tidak nyata terhadap kekerasan permukaan kayu mahoni karena memiliki nilai signifikansi 0,370 ( $\geq 0,05$ ), namun nyata terhadap kekerasan permukaan kayu mindi karena memiliki nilai signifikansi 0,003 ( $\leq 0,05$ ) pada tingkat kepercayaan 95%. Variasi pembakaran memberikan perbedaan nilai kekerasan

yang tidak signifikan terhadap sampel *shou-sugi ban* kayu mahoni, namun signifikan terhadap kayu mindi. Hal ini didukung oleh hasil analisis uji lanjut *tukey* dan *duncan* pada setiap variasi pembakaran yang menunjukkan bahwa sampel kayu mahoni dengan variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit dengan jarak bakar 10 cm selama 8 menit berada pada *subset* yang sama, sedangkan pada kayu mindi berada pada *subset* berbeda sehingga menunjukkan bahwa variasi pembakaran memberikan pengaruh yang tidak signifikan terhadap kekerasan permukaan kayu mahoni, namun signifikan terhadap kekerasan permukaan kayu mindi pada tingkat kepercayaan 95%.



Gambar 12 Kekerasan sampel kontrol dan termodifikasi *shou-sugi ban* pada berbagai variasi lama waktu dan jarak pembakaran kayu mahoni dan mindi

Perubahan nilai kekerasan akibat modifikasi *shou-sugi ban* berbeda pada setiap variasi jarak dan waktu pembakaran. Peningkatan kekerasan terjadi pada sampel kedua jenis kayu yang dibakar dengan jarak 5 cm selama 4 menit, sedangkan pada sampel yang dibakar dengan jarak 10 cm selama 8 menit mengalami penurunan. Peningkatan tersebut dapat disebabkan karena kondisi sampel sebelum diberi perlakuan mulai dari kadar air, jenis kayu dan parameter lainnya. Selain itu, terjadinya ikatan silang lignin pada proses awal pembakaran juga dapat menyebabkan peningkatan kekerasna kayu. Hal tersebut selaras Esteves *et al.* (2021) yang menjelaskan bahwa peningkatan awal pada kekerasan mungkin disebabkan oleh peningkatan ikatan silang pada lignin yang membuat material menjadi lebih keras. Penelitian Karlinasari *et al.* (2018) menunjukkan bahwa perlakuan panas umumnya menurunkan kekerasan kayu cepat tumbuh tropis, terutama pada suhu tinggi dan durasi pemaparan yang lama. Penurunan kekerasan paling konsisten terjadi pada suhu 180 °C selama 2 jam untuk semua jenis kayu yang diteliti. Akan tetapi, pada beberapa kondisi, seperti suhu 120–150 °C dengan pemaparan hingga 6 jam, kekerasan kayu sengon dan jabon justru dapat meningkat, menunjukkan bahwa respons terhadap perlakuan panas bervariasi tergantung pada jenis kayu dan parameter perlakuan. Menurut Kymäläinen *et al.* (2023), secara umum perlakuan panas berdampak negatif

terhadap kekerasan permukaan karena kerusakan struktur dinding sel, sehingga ketahanan aus kayu yang dimodifikasi secara termal dilaporkan lebih rendah dibandingkan dengan kayu yang tidak dimodifikasi, meskipun dalam beberapa kasus nilainya sedikit lebih tinggi.

Penurunan nilai kekerasan sampel modifikasi *shou-sugi ban* kedua jenis kayu dengan variasi jarak bakar 10 cm selama 8 menit disebabkan karena pengaruh durasi pembakaran yang lebih ekstrem. Pembakaran yang lama akan menyebabkan degradasi komponen penyusun struktur kayu terutama hemiselulosa yang lebih banyak, sehingga membuat kekuatan mekanis kayu seperti kekerasan menurun. Hasil tersebut selaras dengan penelitian Icel dan Beram (2017) yang menunjukkan bahwa perlakuan termal pada kayu mengakibatkan penurunan pada sifat mekanisnya, termasuk modulus elastisitas, disertai dengan menurunnya resistansi listrik dan kekerasan kayu, yang dapat berkurang hingga 4% dibandingkan dengan kayu tanpa perlakuan. Kekerasan kayu Cupiúba yang diberi perlakuan *artificial weathering* selama 100 dan 200 jam, yang dapat dijelaskan oleh perubahan pada permukaan kayu selama proses *weathering* (Aquino *et al.* 2021). Baysal (2012) dalam Aquino *et al.* (2021) memverifikasi penurunan kekerasan sebesar 63% pada kayu pinus Scots setelah perlakuan pelapukan buatan selama 500 jam. Penelitian Yusoh *et al.* (2022) menunjukkan bahwa kekerasan semua sampel menurun pada suhu tinggi dan waktu pemanasan yang lebih lama. Kekerasan justru mengalami penurunan pada suhu di atas 180 °C. Secara lebih spesifik, Esteves *et al.* (2021) menjelaskan bahwa perlakuan panas menyebabkan penurunan kekerasan pada semua jenis kayu, dengan penurunan terbesar terjadi pada perlakuan yang lebih ekstrem. Penurunan kekerasan tidak berkorelasi langsung dengan kekerasan awal kayu. Penurunan kekerasan pada perlakuan yang lebih berat kemungkinan disebabkan oleh hilangnya massa yang besar, yang melemahkan kayu, dan efek ini lebih besar dibandingkan pengaruh dari ikatan silang lignin. Kehilangan massa dimulai dari hemiselulosa yang diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat kayu, dan pada perlakuan yang lebih intens, kehilangan hemiselulosa menjadi sangat signifikan. Menurut Ebner *et al.* (2018), umumnya hemiselulosa pada dinding sel terdegradasi akibat panas, yang mengakibatkan penurunan sifat mekanik dari kayu tersebut. Lignin juga menunjukkan tanda-tanda degradasi termal yang ditandai dengan terputusnya ikatan alifatik dan pelepasan fragmen hidrokarbon setelah perlakuan panas.

## SIMPULAN

Variasi lama waktu dan jarak bakar modifikasi termal *shou-sugi ban* memberikan pengaruh yang bervariasi terhadap karakteristik permukaan, fisis dan mekanis kayu mahoni dan mindi. Variasi waktu dan jarak bakar memberikan perubahan warna menjadi lebih gelap, meningkatkan kekasaran kayu sekaligus ketebalan arang yang terbentuk, sekaligus menurunkan kadar air, kerapatan, berat jenis, serta nilai MOE dan MOR pada kedua jenis kayu. Daya serap air cenderung lebih rendah dan kekerasan lebih tinggi terdapat pada kayu dengan variasi pembakaran dengan intensitas yang lebih singkat dengan jarak bakar yang lebih dekat. Intensitas pembakaran yang lebih lama dengan jarak bakar yang lebih jauh cenderung menurunkan sifat-sifat fisis dan mekanis kayu yang dapat mengurangi kualitasnya. Oleh karena itu, *setting* yang paling efektif untuk modifikasi termal

*shou-sugi ban* terhadap kayu mahoni dan mindi yakni variasi jarak bakar 5 cm selama 4 menit.

## DAFTAR PUSTAKA

- [ASTM] American Society for Testing and Materials. 2000. *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM D 143-94*. West Conshohocken: ASTM International.
- [ASTM] American Society for Testing and Materials. 2006. *Standard Test Method of Evaluating Wood Preservatives by Field Test with Stake. ASTM D 1758-06*. Pennsylvania: ASTM International.
- [ASTM] American Standard Testing and Material. 2007. *Standard test methods for adhesion by tape test. ASTM D 3359-02*. West Conshohocken: American Standard Institution.
- [BSI] British Standard Institution. 1957. *Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. BS 373:1957*. London: British Standards Institution.
- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. 2006. *Uji Ketahanan Kayu dan Produk Kayu Terhadap Organisme Perusak Kayu. SNI 01-7207-2006*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- [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
- [JIS] Japanese Industrial Standard. 2010. *Wood Preservatives – Performance Requirements and Their Test Methods for Determining Effectiveness*. Tokyo: JIS K 1571.
- [KLHK]. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2022. *Status Hutan & Kehutanan Indonesia 2022 menuju FOLU Net Sink 2030*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Afifah SE. 2017. Sifat fisis dan keawetan kayu mindi (*Melia azedarach* L.) dari rayap *Cryptotermes cynocephalus* setelah perlakuan pemanasan minyak *Jatropha curcas* [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Aisah AW, Hartanti DAS, Chusnah M, Qomariyah SN. 2022. Kelayakan usaha dan prospek penjualan furniture mahoni (*Swietenia mahagoni*) di sentra pengerajin furniture mahoni Desa Wringinpitu Kabupaten Jombang. *AGROSAINTIFIKA*. 5(1): 24-30.
- Alokabel K, Lay YE, Wonlele T. 2017. Penentuan kelas kuat kayu lokal di pulau timor sebagai bahan konstruksi. *JUTEKS (Jurnal Teknik Sipil)*. 2(2): 139-148.
- Andala B, Fakhruzy F, Susilastri S. 2023. Potensi pemanfaatan batang kelapa sebagai substitusi pengganti kayu. *Sumatera Tropical Forest Research Journal*. 7(1): 177 – 184.
- Aquino VBDM, Bertolini MS, Morais CAGD, Almeida TH, Almeida DH, Lahr FAR, Christoforo AL. 2021. Effect of artificial weathering on physical and mechanical properties of wood. *Revista Árvore*. 45(1): 1-11.
- Artha FD, Prihatmaji YP. 2019. Sifat mekanis bahan kayu pada rumah tradisional batak karo. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 17(1): 101-111.

- Aruni TS. 2019. Eksplorasi material kayu dengan teknik shou sugi ban pada desain tas serial wanita [skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Asikin PP. 2010. Pengaruh fumigasi terhadap sifat fisis dan mekanis beberapa jenis kayu rakyat [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Augustina S, Wahyudi I, Darmawan IW, Malik J. 2020. Ciri anatomi, morfologi serat, dan sifat fisis tiga jenis Lesser-Used Wood Species asal Kalimantan Utara, Indonesia. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 25(4): 599-609.
- Awaludin A, Wusqo U. 2020. Prediksi nilai kuat lentur kayu tropis berdasarkan nilai modulus elastis. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 18(1): 27-42.
- Baysal E. 2012. Surface characteristics of CCA treated scots pine after accelerated weathering. *Wood Research*. 57(3):375–82.
- Bowyer JL, Shmulsky R, Haygreen JG. 2007. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Iowa: Blackwell.
- Browne FL. 1958. *Theories of The Combustion of Wood and Its Control: A Survey of The Literature*. Madison: US Forest Service Research.
- Burhanuddin V, Ulfah D, Emelya R. 2016. Sifat fisika dan nilai keteguhan rekat kayu kecapri (*Sandoricum koetjape* Merr). *Jurnal Hutan Tropis Volume*. 4(2): 145 – 153.
- Candan Z, Gorgun HV, Korkut S, Unsal O. 2021. Surface roughness and wettability performance of thermally modified rowan wood as a fast-growing species. *Drewno*. 64(8): 1 – 10.
- Cermák P, Dejmál A, Paschová Z, Kymäläinen M, Dömény J, Brabec M, Hess D, Rautkari L. 2019. One-sided surface charring of beech wood. *Journal Material Science*. 54(2): 9497–9506.
- Dúbravská K, Kučerová V, Štefková J, Mišíková OG. 2024. Charring of and chemical changes in historical wood under thermal loading. *Forests*. 15(7): 1-18.
- Ebner D, Stelzer R, Barbu MC. 2019. Study of wooden surface carbonization using the traditional japanese yakisugi technique. *ProLigno*. 15(4): 278 – 283.
- Ebner DH, Barbu MC, Klaushofer J, Čermák P. 2021. Surface modification of spruce and fir sawn-timber by charring in the traditional japanese method—yakisugi. *Polymers*. 13(162): 1-11
- Ebner DH, Tortora M, Bedolla DE, Saccomano G, Vacarri L, Barbu MC, Gryzbek J, Schnabel T. 2023. Comparative investigation of chemical and structural properties of charred fir wood samples by Raman and FTIR spectroscopy as well as X-ray-micro-CT technology. *Holzforschung*. 77(9): 734-742.
- Esteves B, Şahin S, Ayata U, Domingos I, Ferreira J, Gürleyen L. 2021. Effect of heat treatment on shore-D hardness of some wood species. *BioResources*. 16(1): 1482 - 1495.
- Fahrussiam F, Chaerani N, Lestari D, Musdi M, Shabrina H. 2023. Introduction of eco-friendly finishing method (yakisugi) among the millennial generation in perina village: innovation in unique furniture products with high aesthetic Value. *Jurnal Malikussaleh Mengabdi*. 2(2): 369 - 375.
- Fahrussiam F, Lestari AT, Chaerani N, Lestari D. 2023. Modifikasi permukaan kayu pinus menggunakan modifikasi finishing tradisional jepang–yakisugi pada beberapa level pengarangan. *PERENNIAL*. 19(1): 19 - 24.

- Fahrussiam F, Pradityatama M, Hidayanti AA. 2024. Pengembangan produk furniture ramah lingkungan berbahan baku kayu cepat tumbuh pada umkm pengolahan kayu UD. Putra Meubeller Lombok Tengah. *Jurnal Abdi Insani*. 11(4): 2286-2294.
- Feist WC. 1990. *Outdoor Wood Weathering and Protection*. Washington: American Chemical Society.
- Fernandes A, Karyadi K, Wardhani IY, Widiati KY, Husien N. 2023. Analysis of red meranti wood color change due to weather exposure in Samarinda. *Earth and Environmental Science*. 1282(1): 1-7.
- Grüll G, Tscherne F, Spitaler I, Forsthuber B. 2014. Comparison of wood coating durability in natural weathering and artificial weathering using fluorescent UV-lamps and water. *European Journal Wood Products*. 72(2): 367–376.
- Hadiyanti IA. 2013. Sifat anti rayap zat ekstraktif kayu teras mindi (*Melia azedarach* Linn.) terhadap serangan rayap tanah *Coptotermes curvignathus* Holmgren [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Halawane JE, Hidayah HN, Kinho J. 2015. *Prospek Pengembangan Jabon Merah, Anthocephalus macrophyllus (roxb.): Solusi Kebutuhan Kayu Masa Depan*. Manado: Badan Penelitian Pengembangan dan Inovasi, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Hasburgh LE, Zelinka SL, Bishell AB, Kirker GT. 2021. Durability and fire performance of charred wood siding (shou sugi ban). *Forests*. 12(9): 1 – 13.
- Herawati E, Hartono R, Sinaga HMM. 2021. Physical and mechanical properties of four wood species from community forests in Binjai Regency, North Sumatra. *Earth and Environmental Science*. 912(1): 12 – 24.
- Herrera R, Arrese A, de Hoyos-Martinez PL, Labidi J, Llano-Ponte R. 2018. Evolution of thermally modified wood properties exposed to natural and artificial weathering and its potential as an element for façades systems. *Construction and Building Materials*. 172(1): 233-242.
- Hon DNS, Minemura N. 2001. *Wood and Cellulosic Chemistry: Color and Discoloration*. New York: Marcel Dekker.
- Icel B, Beram A. 2017. Effects of industrial heat treatment on some physical and mechanical properties of iroko wood. *Drvna Industrija*. 68(5): 229-239.
- Inayah I. 2017. Sifat fisis, mekanis dan finishing kayu mindi (*Melia azedarach* Linn.) termodifikasi silikon emulsi [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Iskandar A. 2017. Studi balok susun papan kayu [skripsi]. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Jankowska A, Kozakiewicz P. 2016. Evaluation of wood resistance to artificial weathering factors using compressive properties. *Wood Industry*. 67(1): 3-8.
- Jankowska A, Wawryszak A, Mazurek A. 2014. The influence of artificial weathering on changes in color of selected coniferous wood species. *Forestry and Wood Technology*. 85(1): 95 – 100.
- Kang CW, Hashitsume K, Jang E, Kolya H. 2023. Relationship between wood anatomical features and surface roughness characteristics. *Wood Resources*. 68(3): 455 - 464.
- Karlinasari L, Lestari AT, Priadi T. 2018. Evaluation of surface roughness and wettability of heat-treated, fast-growing tropical wood species sengon (*Paraserianthes falcataria* (L.) IC Nielsen), jabon (*Anthocephalus cadamba*

- (Roxb.) Miq), and acacia (*Acacia mangium* Willd.). *International Wood Products Journal*. 9(3): 142-148.
- Karlinasari L, Yoresta FS, Priadi T. 2018. Karakteristik perubahan warna dan kekerasan kayu termodifikasi panas pada berbagai suhu dan jenis kayu. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 16(1): 68-82.
- Kerdiati NKLR. 2021. Understanding wood finishing using the japanese wood burning technique (shou sugi ban) in architecture. *Journal of Aesthetics, Design, and Art Management*. 1(1): 15-23.
- Kollman EFP, Cote WA. 1968. *Principle of Wood Science and Technology*. New York: Solid Wood Springer Verlag.
- Kropat M, Hubbe MA, Laleicke F. 2020. Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: a review. *BioResources*. 15(4): 9998-10062.
- Kymäläinen M, Dömény J, Schwarzkopf M, Šeda V, Rautkari L. 2023. Evaluating the quality of surface carbonized woods modified with a contact charring or a gas flame charring technique. *Wood Science and Technology*. 57(6): 1299-1317.
- Kymäläinen M, Hautamäki S, Lillqvist K, Segerholm K, Rautkari L. 2017. Surface modification of solid wood by charring. *Journal of Materials Science*. 52(10): 6111–6119.
- Kymäläinen M, Rautkari L, Hill CAS. 2015. Sorption behaviour of torrefied wood and charcoal determined by dynamic vapour sorption. *Journal of Material Science*. 50(1): 7673–7680.
- Kymäläinen M, Sjökvist T, Dömény J, Rautkari L. 2022. Artificial weathering of contact-charred wood—The effect of modification duration, wood species and material density. *Materials*. 15(11): 39 - 51.
- Kymäläinen M, Turunen H, Čermák P, Hautamäki S, Rautkari L. 2018. Sorption-related characteristics of surface charred spruce wood. *Materials*. 11(11): 1-15.
- Lestari AT, Chaerani N, Lestari D, Wulandari FT, Juniardi RA. 2023. Peningkatan kualitas finishing kayu pinus dan sungkai menggunakan teknik yakisugi. *Tengkawang: Jurnal Ilmu Kehutanan*. 13(2): 142 – 154.
- Lestari AT, Darmawan IW, Nandika D. 2016. Pengaruh kondisi permukaan terhadap daya lekat lapisan pelindung. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 14(1): 11 - 22.
- Listyanto T, Rahman F, Swargarini H. 2016. Kualitas pengeringan kayu mahoni pada berbagai variasi kerapatan incising dengan dua skedul pengeringan suhu tinggi. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 10(2): 119-128.
- Ma'aruf SD. 2023. Modifikasi kayu ramah lingkungan dengan perlakuan minyak panas (hot oil treatment ) menggunakan media minyak kelapa sawit: pengaruh kondisi proses terhadap peningkatan kualitas kayu mindi, sengon, dan batang kelapa [tesis]. Lampung: Universitas Lampung.
- Machová D, Dohnal J, Dömény J, Zárbynická L, Oberle A, Vacenovská V, Čermák P. 2021. Effect of one sided surface charring of beech wood on density profile and surface wettability. *Applied Sciences*. 11(9): 1 – 10.
- Machová D, Oberle A, Zárbynická L, Dohnal J, Šeda V, Dömény J, Čermák P. 2021. Surface characteristics of one-sided charred beech wood. *Polymers*. 13(10): 1 - 51.

- Mamlouk MS, Zaniewski JP. 2006, *Materials for Civil and Construction Engineer*. Prentice Hall: Pearson Education.
- Marsoem SN, Prasetyo VE, Sulisty J, Sudaryono S, Lukmandaru G. 2014. Studi mutu kayu jati di hutan rakyat gunungkidul III. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 8(2): 75-88.
- Martawijaya A, Kartasudjana I, Mandang Y, Prawira SA, Kadir K. 2005. *Atlas Kayu Indonesia Jilid I*. Bogor: Departemen Kehutanan, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Martha R, Basri E, Setiono L, Batubara I, Rahayu IS, Gérardin P, Darmawan W. 2021. The effect of heat treatment on the characteristics of the short rotation teak. *International Wood Products Journal*. 12(3): 218–227.
- Mattjik AA, Sumertajaya IM. 2013. *Perancangan Percobaan dengan Aplikasi SAS dan Minitab*. Bogor: IPB Press.
- Mihailovic V, Miric-Milosavljevic M, Djurkovic M, Mladenovic G, Milosevic M, Trajkovic I. 2022. Loading rate effects on MOE and MOR distributions in testing of small clear beech wood specimens. *Bioresources*. 17(1): 1-18.
- Naelufar A. 2014. Zat ekstraktif kayu mahoni (*Swietenia macrophylla* King) dan pengaruhnya terhadap nilai kalor [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Nasir V, Fathi H, Fallah A, Kazemirad S, Sassani F, Antov P. 2021. Prediction of mechanical properties of artificially weathered wood by color change and machine learning. *Materials*. 14(21): 1 – 18.
- Nawawi DS, Widyani M. 2010. Kajian sifat anatomi dan kimia kayu kaitannya dengan sifat akustik kayu. *Bionatura*. 12(3): 110-116.
- Nhacila F, Siteo E, Uetimane E, Manhica A, Egas A, Möttönen V. 2020. Effects of thermal modification on physical and mechanical properties of Mozambican *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 78(5): 871-878.
- Oey Djoen Seng. 1964. *Berat Jenis dari Jenis-Jenis Kayu Indonesia dan Pengertian Beratnya Kayu untuk Keperluan Praktek*. Bogor: Lembaga Penelitian Hasil Hutan.
- Pandit I, Kurniawan D. 2008. *Anatomi Kayu: Struktur Kayu, Kayu Sebagai Bahan Baku Dan Ciri Diagnostik Kayu Perdagangan Indonesia*. Bogor: IPB Press.
- Pánek M, Oberhofnerová E, Zeidler A, Šedivka P. 2017. Efficacy of hydrophobic coatings in protecting oak wood surfaces during accelerated weathering. *Coatings*. 7(10): 172-175.
- Petrillo M, Sandak J, Grossi P, Sandak A. 2019. Chemical and appearance changes of wood due to artificial weathering–dose–response model. *Journal of near infrared spectroscopy*. 27(1): 26-37.
- Praptoyo H. 2010. *Sifat Anatomi dan Sifat Fisika Kayu Mindi*. Yogyakarta: UGM Press.
- Pratama A. 2015. Ketahanan kayu mindi (*Melia azedarach* L.) dari rayap kayu kering *Cryptotermes cynocephalus* setelah perlakuan pemanasan [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Pratiwi LA, Darmawan W, Priadi T, George B, Merlin A, Gérardin C. 2019. Characterization of thermally modified short and long rotation teaks and the effects on coatings performance. *Ciencia y tecnología*. 21(2): 209-222.

- Pratiwi LD. 2014. Sifat fisis, sifat mekanis, dan sifat finishing kayu mindi (*Melia azedarach* L.) setelah perlakuan pemanasan [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Prijasambada. 2020. *Sifat-Sifat Kayu*. Jakarta: UPI YAI Press.
- Raharja BG. 2019. Analisa teknis dan ekonomis penggunaan laminasi kayu mahoni dan jati sebagai bahan konstruksi lambung kapal ikan [tesis]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rahmawati K, Isnantyo FD. 2019. Analisis tekan komposit laminasi kayu–baja ringan berdasarkan SNI 7973-2013. *Indonesian Journal Of Civil Engineering Education*. 4(2): 103 – 109.
- Rohmaningtyas N. 2022. Hutan wakaf sebagai solusi deforestasi di Indonesia. *ADILLA: Jurnal Ilmiah Ekonomi Syari'ah*. 5(2): 92 - 102.
- Saenuddin NMA, Ansharullah, Faradilla RF. 2020. Isolasi dan karakterisasi microcrystalline cellulose (mcc) dari limbah padat tapioka (onggok). *Jurnal Sains Dan Teknologi Pangan*. 5(5): 3306-3319.
- Sandberg D, Goli G, Todaro L. 2019. *Wood Modification In Europe: A State-Of-The-Art About Processes, Products and Applications*. Florence: Firenze University Press.
- Sandberg D, Haller P, Navi P. 2014. Thermo-hydro and thermo hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*. 8(1): 64 - 88.
- Šeda V, Machová D, Dohnal J, Dömény J, Zárbynická L, Oberle A, Čermák P. 2021. Effect of one-sided surface charring of beech wood on density profile and surface wettability. *Applied Sciences*. 11(9): 1- 10.
- Seftianingsih DK. 2018. Pengenalan berbagai jenis kayu solid dan konstruksinya untuk furniture kayu. *Jurnal Kemadha*. 8(1): 1-14.
- Sianturi S, Hartono R, Sucipto T. 2015. Kualitas papan partikel dari limbah batang kelapa sawit dan mahoni pada variasi kadar perekat phenol formaldehida. *Peronema Forestry Science Journal*. 4(4): 88-96.
- Sivrikaya H, Can A, Troya T, Conde M. 2015. Comparative biological resistance of differently thermal modified wood species against decay fungi, *Reticulitermes grassei* and *Hylotrupes bajulus*. *Ciencia y Tecnologia*. 17(3): 559–570.
- Slamet S, Santoso B, Qomaruddin Q. 2023. Karakterisasi sifat fisis, mekanis dan redaman akustik kayu lokal sebagai bahan alat musik. *Journal of Mechanical Design and Testing*. 5(2): 101-107.
- Soytürk EE, Kartal SN, Arango RA, Ohno KM, Solhan E, Çağlayan I, Ibanez CM. 2023. M Surface carbonization of wood: comparison of the biological performance of Pinus taeda and Eucalyptus bosistoana woods modified by contact charring method. *Wood Material Science & Engineering*. 18(6): 1888-1899.
- Špilák D, Tereňová L, Dúbravská K, Majlingová A. 2018. Analysis of carbonized layer of wood beams with different geometric cross-section shape. *Fire Protection and Safety*. 12(2): 65 - 81.
- Sukarna RM, Hidayat N, Tambunan MS. 2022. Kondisi hutan tropis lahan kering berdasarkan struktur dan komposisi jenis tegakan (Studi kasus pada PT. Sindo Lumber Provinsi Kalimantan Tengah, Indonesia). *Journal of Environment and Management*. 3(1): 80 - 88.

- Sunaryo CF, Mulyono G, Tanaya F. 2019. Perancangan set furniture untuk public space dengan pemanfaatan limbah kayu jati dan resin. *Intra*. 7(2): 893 - 901.
- Supriadi A, Trisatya DR, Sulastiningsih IM. 2020. Sifat kayu lapis yang dibuat dari lima jenis kayu asal Riau. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 25(4): 657-663.
- Sutandar E, Juniardi F, Syahrudin S. 2021. Sifat Fisis Dan Mekanis Kayu Bengkirai. *Jurnal Teknik Sipil*. 21(1): 66-73.
- Timar MC, Varodi AM, Gurău L. 2016. Comparative study of photodegradation of six wood species after short-time UV exposure. *Wood Science Technology*. 50(2): 135–163.
- Tobing G, Sofiatrizkiyah N, Basri E, Martha R, Rahayu I, Gérardin P, Darmawan W. 2024. Mikrostruktur dan karakteristik permukaan kayu pinus scots (*Pinus sylvestris* L.) termodifikasi gliserol dan asam sitrat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 29(4): 554 - 563.
- Ulker O, Aslanova F, Hiziroglu S. 2018. Properties of thermally treated yellow poplar, Southern pine, and Eastern redcedar. *BioResources*. 13(4): 7726-7737.
- Ulker OC, Ulker O, Hiziroglu S. 2021. Volatile organic compounds (VOCs) emitted from coated furniture units. *Coatings*. 11(7): 1 - 15.
- Verinita L. 2015. Ketahanan tiga jenis kayu hutan rakyat terhadap serangan rayap tanah [skripsi]. Bogor: IPB Press.
- Wahyudi W, Wospakrik FA, Rettob BB. 2017. Pengujian sifat mekanis kayu lulu (*Celtis latifolia* Planc) pada dua kondisi kadar air asal Manokwari Papua Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 15(1): 68-74.
- Widyorini R, Khotimah K, Prayitno, Tiberitus A. 2014. Pengaruh suhu dan modifikasi perlakuan panas terhadap sifat fisika dan kualitas finishing kayu mahoni. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 8(2): 65-74
- Williams R. 2005. *Weathering of Wood. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: CRC Press
- Wirawan IKS, Wrasiasi LP, Sadyasmara CAB. 2019. Jalur distribusi kayu mahoni sebagai bahan baku kerajinan dari sawmill sampai ke pengerajin di Kecamatan Tampaksiring. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*. 7(1): 51-57
- Wulandari FT, Amin R, Raehanayati R. 2022. Karakteristik sifat fisika dan mekanika papan laminasi kayu sengon dan kayu bayur. *Euler: Jurnal Ilmiah Matematika, Sains dan Teknologi*. 10(1): 75-87.
- Wulandari FT, Lestari AT. 2023. Variasi arah aksial terhadap sifat fisika dan mekanika kayu mindi (*Melia azedarach* Linn.) dari Desa Senanggalih Kabupaten Lombok timur. *Jurnal Rimba Lestari*. 3(1): 28-38.
- Xing D, Wang S, Li J. 2015. Effect of artificial weathering on the properties of industrial-scale thermally modified wood. *BioResources*. 10(4): 8238-8252.
- Yauk M, Stenson J, Donor M, Van DK. 2020. Evaluating volatile organic compound emissions from cross-laminated timber bonded with a soy-based adhesive. *Buildings*. 10(11): 1 - 12.
- Yoo S, Kelley S, Tilotta DC, Park S. 2018. Structural characterization of Loblolly pine derived bio char by X-ray diffraction and electron energy loss spectroscopy. *ACS Sust Chem Eng*. 6(1): 2621 – 2629.

- Yoresta Fs. 2015. Modulus elastisitas dan kekuatan lentur balok kayu laminasi. *Jurnal Rekayasa Sipil*. 11(1): 41-44.
- Yusoh AS, Sabaruddin FA, Md Tahir P, Lee SH, Uyup MKA, Husain H, Hiziroglu S. 2022. Shear strength and hardness of two tropical wood species as function of heat treatment. *Ciencia y tecnología*. 24(29): 1-10.
- Zelinka SL, Altgen M, Emmerich L, Guigo N, Keplinger T, Kymäläinen M, Thygesen LG. 2022. Review of wood modification and wood functionalization technologies. *Forests*. 13(7): 1 – 46.
- Žigon J, Pavlič M. 2023. Assessment of the combined charring and coating treatments as a wood surface protection technique. *Forests*. 14(3): 1-18..