

Profil Suhu dan Kadar Air Kayu dalam Pengeringan Oven Pemanas dan Gelombang Mikro

(Temperature and Moisture Content Profiles of Woods in Heating and Microwave Ovens Drying)

Trisna Priadi*, Gunes TW Giyarto

Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB, Bogor

*Penulis korespondensi: trisnapriadiipb@yahoo.com

Abstract

This research aimed to evaluate the profile of temperature and moisture content in *Pinus oocarpa* wood being dried with heating oven and microwave oven. The size of samples were (25x70x120) mm³. The temperature profiles in heating oven and microwave oven drying were taken every 10 minutes and 0.5 minutes, respectively. The moisture profiles in heating oven and microwave oven drying were made in every 24 hours and 10 minutes, respectively. The heating oven was set at 60 °C, while microwave oven was set for 2 minutes intermittently with 5 minutes break. In microwave drying, the temperature inside the boards increased faster and higher compared to that in the heating oven, which resulted in a faster moisture movement to the board's surface. The drying rate of pine increased 48-72 times in microwave compared to that in heating oven. The moisture content in the centre of boards being dried in heating oven was much higher than that of in the outer parts. On the other hand, the moisture profile in the woods being dried in microwave oven distributed more evenly.

Keywords: microwave, moisture content, pine wood, temperature profile, wood drying.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menguji profil suhu dan kadar air kayu *Pinus oocarpa* yang dikeringkan dengan oven pemanas dan oven microwave. Ukuran sampel adalah (25x70x120) mm³. Profil suhu dalam kayu yang dikeringkan dengan pengeringan oven pemanas dan oven microwave masing-masing ditentukan setiap 10 menit dan 0,5 menit. Profil kadar air dalam kayu yang dikeringkan dengan oven pemanas dan oven microwave masing-masing dilakukan setiap 24 jam dan 10 menit. Oven pemanas diset pada suhu 60 °C, sementara oven microwave dioperasikan dengan siklus berselang selama 2 menit hidup dan 5 menit mati (relaksasi). Dalam pengeringan gelombang mikro, suhu di dalam kayu meningkat lebih cepat dan lebih tinggi dibandingkan dalam pengeringan oven pemanas, sehingga pergerakan air ke permukaan kayu lebih cepat. Pengeringan kayu pinus dengan gelombang mikro lebih cepat 48-72 kali dibandingkan dengan pengeringan dengan oven pemanas. Kadar air di bagian tengah papan yang dikeringkan dalam oven pemanas jauh lebih tinggi daripada bagian luarnya. Adapun profil kadar air dalam kayu yang dikeringkan dengan gelombang mikro terdistribusi lebih merata.

Kata kunci: gelombang mikro, kadar air, kayu pinus, pengeringan kayu, profil suhu.

Pendahuluan

Proses pengeringan merupakan tahapan pengolahan kayu yang membutuhkan waktu lama dan energi yang tinggi. Dengan demikian teknik pengeringan

harus menjadi perhatian penting dalam proses pengolahan kayu. Suhu pengeringan dan kadar air kayu merupakan faktor yang sangat mempengaruhi proses pengeringan kayu. Suhu pengeringan yang terlalu tinggi

dapat menyebabkan cacat pada kayu, sedangkan suhu yang terlalu rendah dapat mengakibatkan waktu pengeringan terlalu lama. Penggunaan suhu yang tinggi pada pengeringan kayu bisa mengakibatkan *collapse* (Yang *et al.* 2014) dan retak (Hermawan *et al.* 2012). Selain itu, pengeringan dengan udara panas dapat merusak bahan bioaktif dalam kayu. Bahkan pada suhu tinggi cenderung merusak, menyebabkan cacat *case hardening*, perubahan warna, dan cacat kayu lainnya (Mujumdar & Law 2010). Dengan demikian pengaturan suhu harus disesuaikan dengan sifat-sifat kayu yang dikeringkan.

Pada umumnya industri mengeringkan kayu dengan sistem ruang panas dan sistem konvensional yang selain mengatur suhu, juga mengatur kelembaban dan sirkulasi udara. Pengeringan dengan gelombang mikro merupakan teknik pengeringan maju yang telah banyak diteliti dan diaplikasikan di berbagai industri pengolahan kayu (Huang *et al.* 2007; Novotný *et al.* 2014). Pengeringan gelombang mikro banyak dikembangkan terutama di bidang pangan dan sudah menjadi bagian perkakas rumah tangga. Namun aplikasi gelombang mikro dalam pengeringan kayu belum lazim di Indonesia.

Masalah utama dalam proses pengeringan adalah cacat yang sering terjadi, di antaranya berupa retak, pecah, dan perubahan bentuk (memuntir, membusur, membungkuk, dan mencawan) (Vallejos *et al.* 2015). Salah satu penyebab penting cacat pengeringan adalah tegangan-tegangan pengeringan yang timbul karena adanya proses pengeluaran air dari kayu yang tidak seragam pada saat pengeringan. Teknik pengeringan dengan memanfaatkan energi gelombang mikro (*microwave*)

bisa menjadi alternatif dalam menghasilkan kayu kering dengan waktu pengeringan dan cacat minimal (Antti 1995, Dedic & Zlatanovic 2001, Torgovnikov & Vinden 2010).

Frekuensi gelombang mikro yang digunakan secara luas adalah 2450 MHz. Di Amerika digunakan pula frekuensi 896 MHz. Panjang gelombang dari frekuensi-frekuensi tersebut masing-masing 12,24 cm dan 32,77 cm. Dalam sistem oven gelombang mikro terdapat suatu tabung vakum (magnetron) yang berfungsi sebagai generator listrik yang menghasilkan medan listrik bolak-balik di dalam ruang oven. Pada frekuensi 2,45 GHz, magnetron dapat menghasilkan daya antara 500 W-2000 W, bahkan dapat mencapai tingkat maksimum 6-10 kW (Buffler 1993). Ouertani *et al.* (2018) melaporkan bahwa pengeringan kayu pinus dengan gelombang mikro 2,45 GHz dengan daya 1000 W menghasilkan pengeringan yang lebih cepat dan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan dengan daya gelombang mikro 300 W, namun sifat mekanis kayu cenderung menurun dengan semakin tingginya daya gelombang mikro.

Pengeringan gelombang mikro dapat menghasilkan panas di dalam kayu karena transformasi energi elektromagnetik frekuensi tinggi sehingga air secara intensif diuapkan dan diangkut ke permukaan material (Li *et al.* 2011). Pemanasan gelombang mikro dihasilkan dari konversi energi elektromagnetik menjadi energi termal melalui peningkatan agitasi molekul air dan ion bermuatan ketika terkena gelombang mikro. Penetrasi gelombang mikro langsung ke bahan memungkinkan pemanasan jauh lebih cepat daripada metode pemanasan konvensional yang mengandalkan oven pemanas (Tang &

Resurrection Jr. 2009). Kombinasi *incising* (penorehan kayu) dengan pengeringan microwave dan injeksi uap menghasilkan distribusi kadar air yang lebih seragam dan mengurangi retak permukaan dan dalam kayu (Listyanto *et al.* 2013, Listyanto *et al.* 2016).

Pengeringan gelombang mikro menawarkan keunggulan berupa pengeringan yang cepat, hemat energi, penetrasi energi gelombang mikro yang dalam, kontrol elektronik yang cepat dan akurat, serta proses pemanasan yang bersih (Rattanadecho & Makul 2016). Pengeringan gelombang mikro dapat menurunkan kadar air kayu *Pinus radiata* dari 13% ke 6% dalam waktu sangat singkat dan distribusi kadar air yang seragam (Sethy *et al.* 2016). Gelombang mikro dapat juga digunakan sebagai perlakuan pendahuluan sebelum pengeringan sehingga permeabilitas kayu meningkat dan cacat pengeringan (*collapse* dan retak) mengalami penurunan (Balboni *et al.* 2018). Sejumlah aplikasi komersial gelombang mikro dalam pengolahan kayu telah dikembangkan baik dalam pengeringan cepat, pengawetan, pengurangan tegangan pertumbuhan, modifikasi bahan kayu atau dalam pembuatan pulp (Torgovnikov & Vinden 2010).

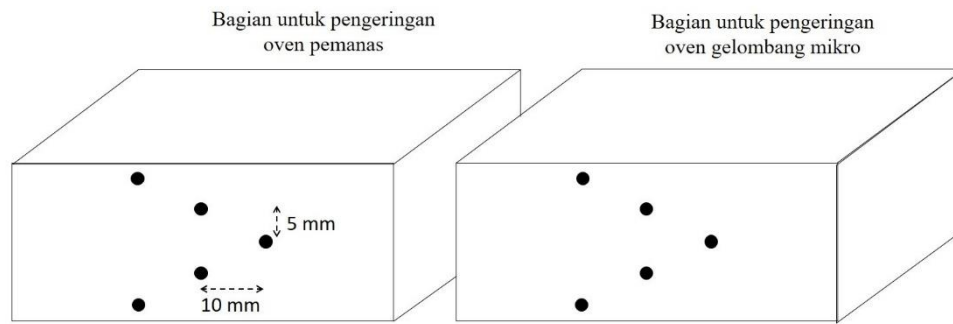
Penelitian ini bertujuan untuk menguji profil suhu dan kadar air dalam kayu pinus (*Pinus oocarpa*) yang dikeringkan menggunakan *heating oven* dan *microwave oven*. Karakteristik ini penting karena berpengaruh terhadap cacat-cacat yang mungkin terjadi pada kayu yang dikeringkan. *Pinus oocarpa* merupakan salah satu jenis pohon pinus yang ditanam di Hutan Pendidikan Gunung Walat (HPGW), Kabupaten Sukabumi yang menghasilkan resin (Christine *et al.* 2017) dan kayunya berkualitas baik dekoratif dan

berkerapatan kering udara $0,56 \text{ g.cm}^{-3}$ (Cavalheiro *et al.* 2016). Hasil penelitian ini diharapkan bisa jadi bahan pertimbangan dalam pengembangan teknologi pengeringan kayu di Indonesia yang lebih maju.

Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan di workshop dan Laboratorium Sifat Fisis Kayu, Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB dan di Laboratorium Energi dan Elektrifikasi Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian IPB. Bahan kayu dari pohon pinus (*Pinus oocarpa*) berdiameter ± 30 cm berasal dari Hutan Pendidikan Gunung Walat, Kabupaten Sukabumi. Bahan pendukung lainnya adalah perekat silikion yang digunakan sebagai pelabur ujung (*end coat*) contoh uji.

Contoh uji profil suhu berupa kayu pinus berukuran $(25 \times 70 \times 120) \text{ mm}^3$ yang dipotong menjadi dua bagian untuk dikeringkan menggunakan 2 metode yang berbeda yaitu menggunakan oven pemanas (*heating oven*) (Memmert 1400 W, $60 \text{ }^\circ\text{C}$) dan oven gelombang mikro (*microwave oven*) (Electrolux 720 W; 2450 MHz; 20 Liter). Profil suhu dibuat berdasarkan data suhu pada 5 titik ketebalan, dengan terlebih dahulu dibuat lima lubang dengan kedalaman 20 mm dari bagian pinggir papan dengan jarak arah tebal antar pusat lubang 5 mm (Gambar 1). Pembuatan profil suhu kayu dilakukan dengan mengukur suhu kayu di dalam oven pada tiap-tiap lubang menggunakan kabel *thermocouple* yang dihubungkan dengan alat pembaca suhu, *hibrid recorder*. Pada pengeringan oven pemanas, pengukuran suhu kayu dilakukan setiap 10 menit, sedangkan pada pengeringan *microwave* (gelombang mikro) dilakukan setiap 0,5 menit pengoperasian.



Gambar 1 Posisi lubang pengukuran suhu pada contoh uji pengeringan kayu.

Suhu yang digunakan dalam oven pemanas menggunakan suhu 60 °C, sedangkan pada oven gelombang mikro menggunakan skala daya maksimal (720 W). Pengukuran suhu pada setiap perlakuan dilakukan sebanyak 5 kali dengan 3 ulangan.

Contoh uji profil kadar air adalah papan berukuran (25x70x120) mm³. Seluruh contoh uji dalam keadaan segar dengan kadar air hasil pengukuran moisture meter ±80%. Jumlah ulangan dalam pengujian adalah 6 kali. Contoh uji kayu dikeringkan dengan dua alat (oven pemanas dan oven gelombang mikro) sampai kadar air di bawah 14%. Penentuan profil kadar air dalam papan dilakukan setiap 24 jam pengeringan oven pemanas (*heating oven*) dan setiap 5 kali pengoprasian oven gelombang mikro yang masing-masing terdiri dari 2 menit oven hidup dengan jeda 5 menit oven mati. Contoh uji dipotong dengan gergaji mesin 5 mm dari ujung setiap papan. Selanjutnya potongan tersebut dibelah dengan *cutter* menjadi 5 bagian pada arah tebal (S1, S2, S3, S4, S5) untuk dikeringkan pada suhu 103±2 °C. Penimbangan setiap bagian dilakukan segera setelah pembelahan dan setelah kelima bagian tersebut dikering-ovenkan. Dengan demikian kadar air (KA) setiap bagian bisa diperoleh untuk menentukan

profil kadar air. Gradien kadar air (M) ditentukan di kedua bagian permukaan antara S1 dan S2, juga antara bagian S4 dan S5. Kadar air, gradien kadar air, dan perubahan gradien kadar air dihitung menggunakan Rumus 1, 2 dan 3 (Skaar 2012):

$$KA = \frac{BA - BKO}{BKO} \times 100 \quad (1)$$

$$M = \frac{y_2 - y_1}{5} \quad (2)$$

$$\Delta M = M_B - M_A \quad (3)$$

dengan KA = kadar air (%), BA = berat awal contoh uji (g), BKO = berat kering oven (g), M = gradien kadar air (%.mm⁻¹), y₁ = kadar air bagian terluar S1 atau S5 (%), y₂ = kadar air bagian kedua dari luar S2 atau S4 (%), 5 = tebal setiap bagian (mm), ΔM = perubahan gradien kadar air (%.mm⁻¹), M_A = gradien kadar air awal pengeringan (%.mm⁻¹), M_B = gradien kadar air akhir pengeringan (%.mm⁻¹).

Data hasil pengukuran temperatur dan kadar air dianalisis secara deskriptif dan grafis. Analisis ragam dan uji lanjut Duncan dilakukan untuk pengaruh metode pengeringan terhadap perubahan gradien kadar dalam rancangan acak lengkap.

Hasil dan Pembahasan

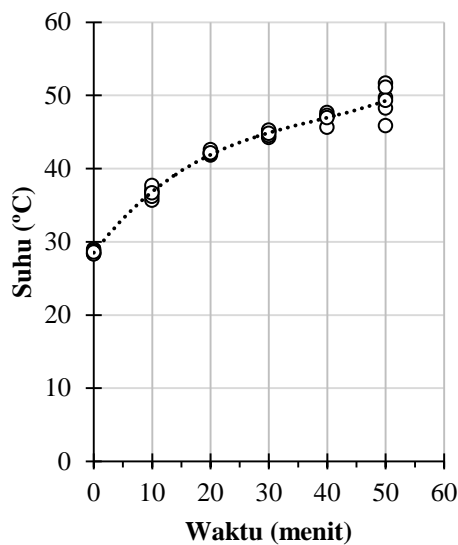
Profil suhu dalam pengeringan kayu pinus

Penelitian ini membuktikan bahwa pengeringan dengan oven gelombang mikro (OGM) mampu menaikkan suhu kayu lebih cepat dibanding oven pemanas (OP) (Gambar 2). Pada 30 detik pertama, suhu rata-rata kelima titik pengukuran pada kedalaman 20 mm contoh uji kayu pinus yang dikeringkan dengan OGM naik dari 28,85 °C menjadi 88,94 °C (kenaikan 70,09 °C). Sedangkan dalam OP, selama 50 menit hanya mampu menaikkan suhu rata-rata dari 28,57 °C menjadi 49,30 °C (kenaikan 20,73 °C).

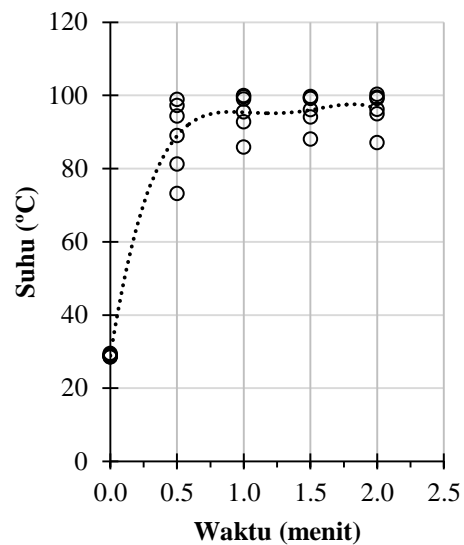
Oven pemanas menggunakan prinsip konveksi dan konduksi dalam memanaskan kayu (Keey *et al.* 2012). Elemen pemanas oven memanaskan udara di dalam oven membutuhkan waktu yang agak lama hingga seluruh udara di dalam ruang oven mencapai suhu yang ditetapkan yaitu 60 °C.

Energi panas dari elemen pemanas bergerak secara konveksi melalui udara ke permukaan kayu. Naiknya suhu permukaan kayu diikuti dengan perpindahan kalor secara konduksi ke bagian dalam kayu yang bersuhu lebih rendah. Seiring dengan waktu pemanasan, suhu bagian dalam kayu pun terus meningkat.

Oven pemanas menggunakan prinsip konveksi dan konduksi dalam memanaskan kayu (Keey *et al.* 2012). Elemen pemanas oven memanaskan udara di dalam oven membutuhkan waktu yang agak lama hingga seluruh udara di dalam ruang oven mencapai suhu yang ditetapkan yaitu 60 °C. Energi panas dari elemen pemanas bergerak secara konveksi melalui udara ke permukaan kayu. Naiknya suhu permukaan kayu diikuti dengan perpindahan kalor secara konduksi ke bagian dalam kayu yang bersuhu lebih rendah. Seiring dengan waktu pemanasan, suhu bagian dalam kayu pun terus meningkat.



(A)



(B)

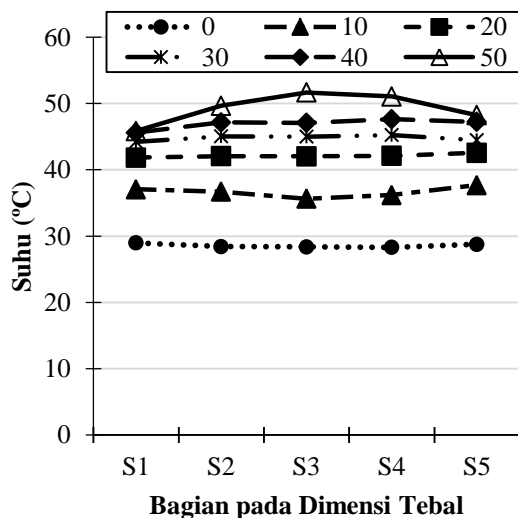
Gambar 2 Perubahan suhu kayu dalam pengeringan dengan oven pemanas (A) dan oven gelombang mikro (B).

Pada Gambar 2A terlihat bahwa kenaikan suhu dalam OP dari menit pertama sampai menit ke-20 berlangsung agak cepat. Ketika suhu kayu bagian luar mendekati 60 °C, kenaikan suhu kayu mulai menurun. Tampak kurva yang semakin landai setelah 20 menit pemanasan. Laju peningkatan suhu permukaan kayu menurun seiring dengan naiknya suhu kayu mendekati suhu lingkungan atau suhu oven, sedangkan konduksi termal ke dalam kayu terus berjalan bahkan meningkat seiring naiknya suhu permukaan kayu.

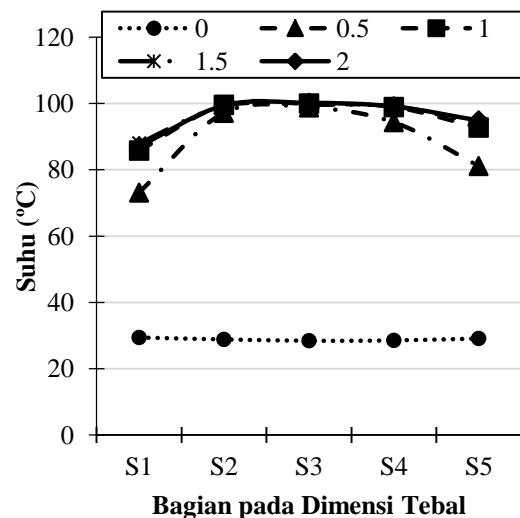
Pada Gambar 2B tampak jelas dalam waktu 30 detik pengeringan suhu dalam kayu meningkat sangat cepat hingga ada bagian yang mendekati suhu 100 °C. Oven gelombang mikro menggunakan sistem radiasi gelombang yang dipancarkan dari magnetron ke dalam ruangan pengering dan menembus ke seluruh bagian kayu dengan cepat. Semua molekul air yang terkandung di seluruh bagian kayu terpengaruh gelombang tersebut dan mengalami pergerakan yang cepat karena molekul

air bersifat dipolar. Gerakan seluruh molekul air dalam frekuensi tinggi menimbulkan gesekan yang menghasilkan panas sehingga suhu di seluruh bagian kayu yang berair meningkat (Hartulistiyoso 2000). Oleh karena itu pemanasan dalam kayu yang dikeringkan dengan gelombang mikro lebih cepat dibanding dengan pemanasan dalam kayu yang dikeringkan dengan oven pemanas.

Terdapat perbedaan profil suhu dalam kayu pinus yang dikeringkan dengan oven gelombang mikro (OGM) dibanding dengan oven pemanas (OP) (Gambar 3). Dalam pengeringan oven pemanas suhu bagian luar kayu lebih tinggi dibanding bagian dalamnya paling tidak hingga 20 menit pemanasan. Sebagaimana Mujumdar (2000) mengungkapkan bahwa profil suhu yang terjadi dalam pengeringan oven pemanas disebabkan adanya pemanasan lebih awal pada permukaan bahan yang dikeringkan. Selanjutnya bagian benda bersuhu tinggi mengalirkan kalor ke bagian dalam yang bersuhu lebih rendah.



(A)



(B)

Gambar 3 Suhu di berbagai bagian kedalaman kayu pada setiap waktu pengamatan 0-50 menit dalam pengeringan oven pemanas (A) dan waktu pengamatan 0-2 menit dalam pengeringan oven gelombang mikro (B).

Dalam menit ke-30 profil suhu dalam kayu mulai agak cembung, yaitu suhu di bagian dalam sedikit lebih tinggi daripada di bagian luarnya (Gambar 3A). Hal ini karena suhu di bagian luar agak turun saat pengukurannya. Dalam pengeringan hingga 50 menit belum ada bagian kayu yang mencapai 60 °C sebagaimana yang diatur dalam OP.

Dalam pengeringan oven gelombang mikro (OGM) (Gambar 3B) profil suhu awal dalam kayu pinus membentuk kurva agak cekung terbuka ke atas. Kondisi ini sama seperti pada contoh uji yang dikeringkan dengan oven pemanas biasa (OP). Hal ini merupakan kondisi normal kayu yang berada cukup lama di udara terbuka, yaitu bagian luar kayu memiliki suhu sedikit lebih tinggi dibandingkan bagian dalamnya. Namun dalam pengeringan detik ke-30 terjadi pergeseran cepat kurva ke atas dengan bentuk parabola terbuka ke bawah. Hal ini berarti bagian tengah kayu memiliki suhu lebih tinggi daripada bagian luarnya. Kondisi ini merupakan kebalikan dari profil temperatur kayu yang dikeringkan menggunakan OP. Perbedaan suhu yang besar antara bagian dalam dan luar kayu pinus sudah terjadi dalam setengah menit pengeringan. Bahkan dalam waktu 2 menit bagian dalam kayu sudah mencapai 100 °C. Tingginya suhu di bagian dalam kayu ini menjadi pendorong pergerakan tekanan uap dari dalam kayu yang menyebabkan pergerakan air dari dalam kayu ke permukaan yang tinggi (Keey *et al.* 2012). Hal tersebut juga ditunjang dengan meningkatnya permeabilitas kayu seiring dengan peningkatan suhu tersebut (Torgovnikov & Vinden 2010). Profil suhu pada pengeringan OGM detik ke-60 sampai 120 relatif sama yang memiliki suhu bagian tengah kayu mendekati 100 °C. Suhu yang tinggi di dalam kayu

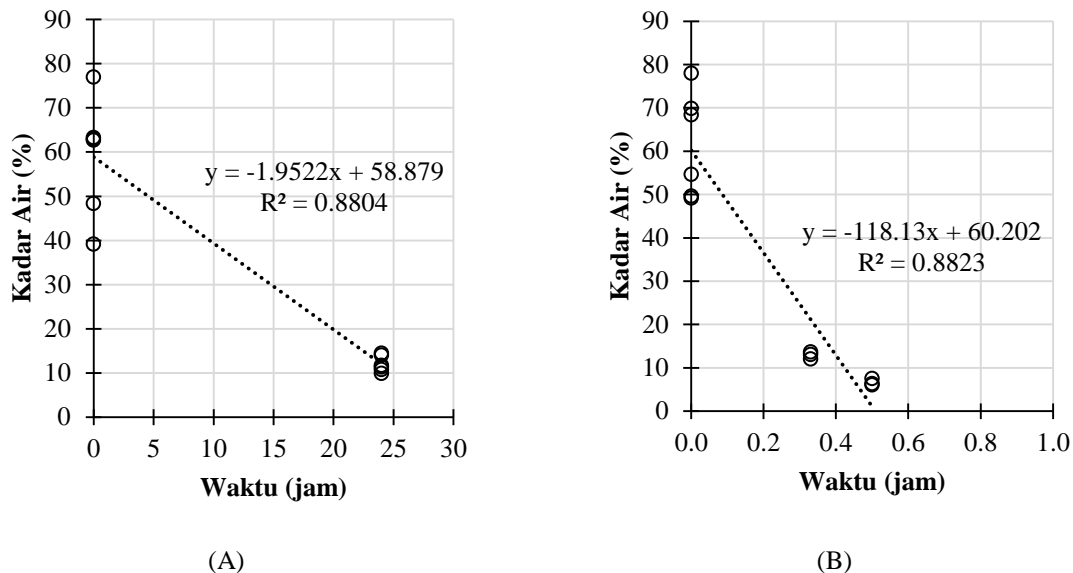
mengubah air menjadi uap yang secara simultan bergerak ke permukaan kayu lebih cepat dari pergerakan air cair. Besarnya tekanan uap ini dapat dilihat pada bahan *end coat* (pelapis ujung kayu) menggelembung pada saat kayu dikeringkan diiringi suara mendesis. Penggelembungan bahan *end coat* ini tidak terjadi pada kayu pinus yang dikeringkan dengan OP.

Profil kadar air dalam pengeringan kayu

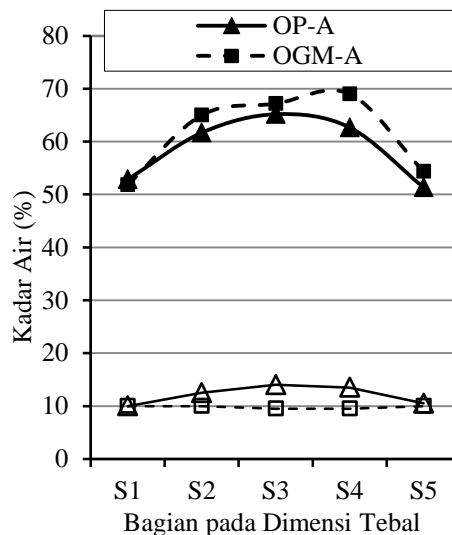
Hasil penelitian menunjukkan bahwa oven gelombang mikro (OGM) mampu mengeringkan kayu pinus jauh lebih cepat dari pada oven pemanas biasa (OP), yaitu sekitar 48 sampai 72 kalinya. Kadar air awal kayu pinus ±80% dikeringkan dengan OGM menjadi 6%-13% dalam waktu 20-30 menit atau 0,3-0,5 jam. Sedangkan OP dengan suhu 60 °C memerlukan waktu 24-48 jam untuk mengeringkan kayu pinus dari kadar air ±70% menjadi 9%-14%. Kurva penurunan kadar air kayu pinus yang dikeringkan dengan oven gelombang mikro (OGM) lebih curam dibandingkan dengan yang dikeringkan dengan oven pemanas biasa (OP) (Gambar 4). Tingginya kecepatan penurunan kadar air pada pengeringan gelombang mikro terkait dengan pemanasan yang terjadi secara serentak akibat radiasi gelombang mikro di seluruh bagian kayu sehingga suhu di dalam kayu cukup tinggi dan menyebabkan perubahan air menjadi uap (Ouertani *et al.* 2015). Tekanan uap di dalam kayu menjadi tinggi dan mendorong pergerakan air yang cepat ke permukaan kayu. Selain itu menurut Zhang *et al.* (2013) gelombang mikro juga dapat meningkatkan kecepatan pengeringan karena suhu dan tekanan uap yang tinggi dapat mengurangi noktah teraspirasi di dalam kayu.

Profil kadar air dalam kayu pinus di akhir pengeringan OGM lebih merata dibandingkan dengan yang dikeringkan dengan OP (Gambar 5). Semua kurva profil kadar air kayu yang dikeringkan dengan OP membentuk kurva parabola terbuka ke bawah, dengan bagian tengah kayu sebagai puncak kurva berkadar air tertinggi. Terdapat perbedaan yang besar antara kadar air bagian luar dan bagian dalam. Perbedaan kadar air di

permukaan dan dalam kayu yang terlalu besar berpotensi menimbulkan tegangan pengeringan dan cacat dalam proses pengeringan dan pengolahan lanjutannya. Sebagaimana diungkapkan oleh Moutee *et al.* (2007) bahwa tegangan pengeringan sering mengakibatkan retak dan perubahan bentuk (distorsi) pada kayu yang sangat mempengaruhi kualitas produk.



Gambar 4 Penurunan kadar air kayu pinus dalam pengeringan oven pemanas dan oven gelombang mikro.

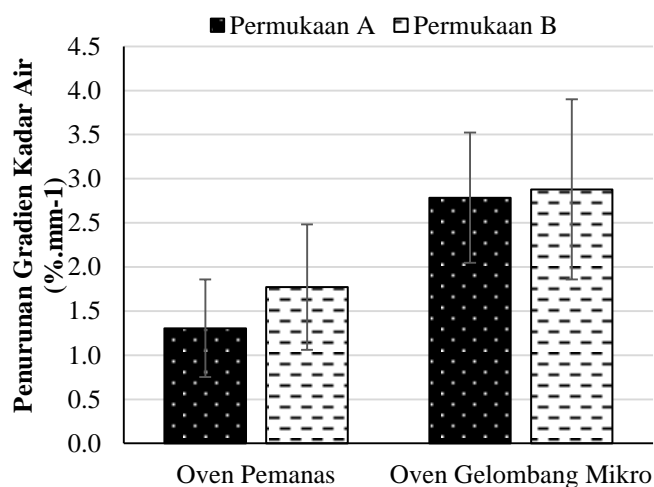


Gambar 5 Profil rata-rata kadar air dalam kayu pinus pada awal (OP-A) dan akhir (OP-B) pengeringan oven pemanas serta awal (OGM-A) dan akhir (OGM-B) pengeringan oven gelombang mikro.

Sebagian besar kurva profil kadar air dalam kayu pinus pada akhir pengeringan dengan OGM terlihat lebih datar bahkan agak membentuk kurva parabola terbuka ke atas. Kondisi ini menunjukkan bagian dalam kayu sedikit lebih kering. Kondisi ini sangat menguntungkan karena bisa mencegah terjadinya distorsi dan pecah/retak pada kayu selama pengeringan maupun dalam pengolahan lanjutannya.

Perbedaan kadar air dalam kayu bisa dinyatakan dengan gradien kadar air (M), terutama di bagian permukaan kayu yang penting dalam mengendalikan retak permukaan dalam proses pengeringan kayu. Nilai M di awal pengeringan adalah tinggi karena permukaan kayu sudah mengering di ruang terbuka, sedangkan bagian dalamnya masih basah. Seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan, gradien kadar air semakin kecil. Nilai rata-rata perubahan (penurunan) gradien kadar air (ΔM) pada

pengeringan kayu pinus menggunakan OGM adalah $2,87 \text{ \%} \cdot \text{mm}^{-1}$, dua kali lebih besar dibandingkan dengan pengeringan OP, yaitu $1,34 \text{ \%} \cdot \text{mm}^{-1}$ (Gambar 6). Hal ini didukung dengan hasil uji statistik bahwa metode pengeringan berpengaruh nyata terhadap nilai perubahan gradien kadar air (ΔM) pada selang kepercayaan 95%. Penurunan gradien kadar air (ΔM) kayu pinus pada pengeringan OGM nyata lebih besar dari pada pengeringan OP. Turunnya nilai gradien kadar air menunjukkan semakin kecilnya selisih kadar air kayu antara bagian terluar dan di sebelah dalamnya. Pengeringan dengan OP pada suhu $\pm 60 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan gradien kadar air (M) yang masih relatif tinggi pada permukaan kayu pinus diduga mendukung terjadinya retak permukaan. Sekitar 50% kayu pinus yang dikeringkan dengan OP mengalami retak permukaan, sedangkan yang dikeringkan dengan OGM tidak mengalami retak permukaan (Tabel 1).



Gambar 6 Penurunan gradien kadar air (ΔM) pada bagian permukaan kayu pinus yang dikeringkan dengan oven pemanas dan oven gelombang mikro.

Tabel 1 Cacat retak pada papan pinus yang dikeringkan dengan oven pemanas dan oven gelombang mikro

	Jumlah papan retak	Persentase, %
Oven pemanas	3	50
Oven gelombang mikro	0	0

Retak yang terjadi pada kayu pinus yang dikeringkan dengan OP disebabkan oleh tegangan pengeringan terutama adalah tegangan tarik di bagian permukaan kayu yang melebihi kekuatan tarik tegak lurus serat kayu tersebut. Tegangan pengeringan dipicu oleh distribusi kadar air yang tidak merata (Zhang *et al.* 2020), terutama pada saat permukaan kayu sudah kering dan berusaha menyusut sedangkan kadar air bagian dalamnya masih tinggi dan belum menyusut.

Kayu pinus yang dikeringkan dengan OGM tidak ada yang mengalami cacat. Hal ini disebabkan gelombang mikro mampu mengeringkan kayu lebih merata di seluruh bagian kayu yang dikeringkan. Hal ini sesuai dengan He dan Wang (2015) bahwa radiasi gelombang mikro mengurangi gradien kadar air dan tegangan pengeringan pada kayu *Eucalyptus urophylla* x *E. tereticornis*. Dilaporkan juga sebelumnya oleh Harris *et al.* (2011) bahwa pengeringan gelombang mikro 2 kW dengan siklus berulang aplikasi 30 detik diikuti dengan relaksasi 90 detik (tanpa gelombang mikro) berhasil mengurangi waktu pengeringan dari beberapa minggu atau bulan menjadi berjam-jam. Kayupun dapat dikeringkan tanpa cacat. Dalam aplikasinya bahkan radiasi gelombang mikro dapat digunakan untuk mengeringkan komponen bangunan yang mengalami pembasahan serta mengendalikan serangan organisme perusak (Bečkovský *et al.* 2016).

Selain banyak keunggulan pengeringan kayu dengan gelombang mikro, kebutuhan energi listrik yang besar dianggap masalah dalam aplikasi pengeringan gelombang mikro di lapangan (Henin *et al.* 2008). Selain itu ada juga resiko masalah yang dapat terjadi dalam pengeringan gelombang

mikro yaitu *overheating* (pemanasan berlebih) yang disebabkan oleh tidak seragamnya medan gelombang mikro dan keragaman bahan kayu (Novotný *et al.* 2014). Hal-hal tersebut menjadi perhatian dalam penyempurnaan aplikasi gelombang mikro yang lebih baik.

Kesimpulan

Oven gelombang mikro menghasilkan kenaikan suhu dalam kayu pinus yang lebih cepat dengan profil kurva suhu bagian dalam lebih tinggi dibanding bagian luarnya. Hal ini terjadi karena gelombang mikro merambat cepat ke dalam kayu yang menyebabkan air yang lebih banyak di dalam kayu bergerak dan semakin tinggi suhunya. Adapun profil suhu dalam pengeringan oven pemanas menunjukkan perbedaan suhu bagian luar dan dalam yang tidak besar. Penurunan kadar air pada kayu pinus yang dikeringkan dengan oven gelombang mikro lebih cepat dengan profil kadar air pada akhir pengeringan yang lebih seragam dibanding dengan profil kadar air pada pengeringan oven pemanas. Hal ini mendukung proses pengeringan gelombang mikro yang lebih aman dari resiko cacat dibanding pengeringan oven pemanas.

Daftar Pustaka

- Antti AL. 1995. Microwave drying of pine and spruce. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 53:333-338. <https://doi.org/10.1007/s001070050102>.
- Balboni BM, Ozarska B, Garcia JN, Torgovnikov G. 2018. Microwave treatment of *Eucalyptus macrorhyncha* timber for reducing drying defects and its impact on physical and mechanical wood properties. *Eur. J. Wood Prod.* 76:861-870.

- <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1260-1>.
- Bečkovský D, Vacková L, Bečkovská T, Sobotka J, Pěňčík J, Lavický M. 2016. Analysis of the diffusional properties of peripheral walls of wooden houses during Emw radiation exposure. *Wood Res.* 61(4): 627-636.
- Buffler CR. 1993. *Microwave Cooking and Processing*. New York: The AVI Publ. Co.
- Cavalheiro RS, Almeida DH, Almeida TH, Christoforo AL, Lahr FAR. 2016. Density as estimator of shrinkage for some Brazilian wood species. *Int. J. Mater. Eng. Innov.* 6(3):107-112. doi: 10.5923/j.ijme.20160603.08.
- Christine DP, Syaufina L., Santosa G. 2017. The effect of various types of forest fires on pine resin productivity in Gunung Walat University Forest, Sukabumi, Indonesia. *Biodiversitas.* 18(1):476-482. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180158>.
- Dedic A, Zlatanovic M. 2001. Some aspects and comparisons of microwave drying of beech (*Fagus moesiaca*) and fir wood (*Abies alba*). *Holz als Roh- und Werkstoff.* 59:246-249. <https://doi.org/10.1007/s001070100204>.
- Harris GA, Brodie GI, Ozarska B, Taube A. 2011. Design of a microwave chamber for the purpose of drying of wood components for furniture. *ASABE.* 54(1):363-368.
- Hartulistiyoso E. 2000. Penghematan energi pada proses pengelolaan rempah-rempah dengan energi gelombang mikro. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Pertanian AE*; 2000 Juli 11-12; Bogor, Indonesia.
- Hasanati M, Itaya Y. 1996. Drying-induced strain and stress: a review. *Dry. Technol.* 14(5):1011-1040.
- He Q, Wang X. 2015. Drying stress relaxation of wood subjected to microwave radiation. *Bioresources.* 10(3):4441-4452.
- Henin JM, Charron S, Luypaert PJ, Jourez B, Hebert J. 2008. Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15. *For. Prod. J.* 58(12):75-81.
- Hermawan A, Fujimoto N, Sakagami H. 2012. Effects of high-temperature and low-humidity pretreatment on the drying properties of sugi boxed-heart timber with black-colored heartwood. *Dry. Technol.* 30(7):780-786.
- Key RB, Langrish TA, Walker J C. 2012. *Kiln-Drying of Lumber*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Li ZY, Wang RF, Kudra T. 2011. Uniformity issue in microwave drying. *Dry. Technol.* 29(6):652-660.
- Listyanto T, Ando K, Yamauchi H, Hattori N. 2013. Microwave and steam injection drying of CO₂ laser incised sugi lumber. *J. Wood Sci.* 59(4):282-289. DOI 10.1007/s10086-013-1331-9.
- Listyanto T, Ando K, Yamauchi H, Hattori N. 2016. CO₂ Laser-incised teak and mahogany lumber dried by microwave and steam injection. *For. Prod. J.* 66(7-8):461-466. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-15-00082>.
- Moutee M, Fortin Y, Fafard M. 2007. A global rheological model of wood cantilever as applied to wood drying. *Wood Sci Technol.* 41(209).

- <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0106-5>.
- Mujumdar AS. 2000. *Drying Technology in Agricultural and Food Sciences*. Cambridge: Wood Head Publishing.
- Mujumdar AS, Law CL. 2010. Drying technology: trends and applications in postharvest processing. *Food Bioprocess Technol.* 3(6):843-852.
- Novotný M, Šuhajda K, Sobotka J, Gintar J, Šuhajdová E, Mátl M. 2014. Use of microwave radiation in building industry through application of wood element drying. *Wood Res.* 59(3):389-400.
- Ouertani S, Hassini L, Azzouz S, Torres SS, Belghith A, Koubaa A. 2015. Modeling of combined microwave and convective drying of wood: Prediction of mechanical behavior via internal gas pressure. *Dry. Technol.* 33(10):1234-1242. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1022828>.
- Ouertani S, Koubaa A, Azzouz S, Bahar R, Hassini L, Belghith A. 2018. Microwave drying kinetics of jack pine wood: determination of phytosanitary efficacy, energy consumption, and mechanical properties. *Eur. J. Wood Prod.* 76:1101-1111. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1316-x>.
- Rattanadecho P, Makul N. 2016. Microwave-assisted drying: a review of the state-of-the-art. *Dry. Technol.* 34(1):1-38.
- Skaar C. 2012. *Wood-water relations*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Tang J, Resurrection Jr. FP. 2009. *Development of Packaging and Products for Use in Microwave ovens*. Washington State University: Woodhead Publishing Limited.
- Torgovnikov G, Vinden P. 2010. Microwave wood modification technology and its applications. *For. Prod. J.* 60(2):173-182.
- Vallejos J, Moya R, Serrano R. 2015. Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. *Maderas: Cienc. Tecnol.* 17(2):365-372. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000034.
- Yang L, Liu H, Cai, Y, Hayashi K, Wu Z. 2014. Effect of drying conditions on the collapse-prone wood of *Eucalyptus urophylla*. *Bioresources.* 9(4):7288-7298.
- Zhang J, Liu H, Yang H, Yang L. 2020. Drying characteristics of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* with Supercritical CO₂. *Materials.* 13(3989):1-13. doi:10.3390/ma13183989.
- Zhang Y, Jia K, Cai L, Shi SQ. 2013. Acceleration of moisture migration in larch wood through microwave pre-treatments. *Dry. Technol.* 31(6): 666-671.