

— TEKNOLOGI — MODIFIKASI KAYU RAMAH LINGKUNGAN:

Modifikasi Panas dan Pengaruhnya
terhadap Sifat-sifat Kayu



Wahyu Hidayat menyelesaikan pendidikan sarjana (S-1) di Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor, pascasarjana (S-2) di National Chiayi University, Taiwan, dan pendidikan doktoral (S-3) di Kangwon National University, Korea Selatan. Sejak tahun 2009 menjadi staf pengajar pada Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas Lampung, dalam mata kuliah Struktur dan sifat-sifat kayu, Dasar-dasar kayu komposit, dan Dasar-dasar pengolahan kayu. Buku ini ditulis berdasarkan pengalaman dan hasil penelitian penulis yang telah dipublikasikan pada beberapa jurnal nasional maupun internasional.



Fauzi Febrianto menamatkan pendidikan sarjana (S-1) dan pascasarjana (S-2) dari Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor dan pendidikan doktoral (S-3) dari Kyoto University, Jepang. Penulis merupakan Guru Besar pada Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan IPB dengan bidang keahlian teknologi kayu komposit dan modifikasi kayu.

TEKNOLOGI MODIFIKASI KAYU RAMAH LINGKUNGAN:
Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-sifat Kayu

Wahyu Hidayat | Fauzi Febrianto

Wahyu Hidayat
Fauzi Febrianto

Before

After



— TEKNOLOGI — MODIFIKASI KAYU RAMAH LINGKUNGAN:

Modifikasi Panas dan Pengaruhnya
terhadap Sifat-sifat Kayu

— TEKNOLOGI —

MODIFIKASI KAYU

RAMAH LINGKUNGAN:

*Modifikasi Panas dan Pengaruhnya
terhadap Sifat-sifat Kayu*

Hak cipta pada penulis
Hak penerbitan pada penerbit

Tidak boleh diproduksi sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun
Tanpa izin tertulis dari pengarang dan/atau penerbit

Kutipan Pasal 72 :

Sanksi pelanggaran Undang-undang Hak Cipta (UU No. 10 Tahun 2012)

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal (49) ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1. 000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan atau denda paling banyak Rp. 5. 000.000.000,00 (lima miliar rupiah)
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarakan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau hasil barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

**Wahyu Hidayat
Fauzi Febrianto**

— TEKNOLOGI —
MODIFIKASI KAYU
RAMAH LINGKUNGAN:

*Modifikasi Panas dan Pengaruhnya
terhadap Sifat-sifat Kayu*



Perpustakaan Nasional RI:
Katalog Dalam Terbitan (KDT)

**TEKNOLOGI MODIFIKASI KAYU RAMAH LINGKUNGAN:
Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-sifat Kayu**

Penulis:
Wahyu Hidayat
Fauzi Febrianto

Desain Cover & Layout
Pusaka Media Design

xvi+127 hal : 15,5 x 23 cm
Cetakan Oktober 2018

ISBN: 978-602-5947-22-3

Penerbit
Pusaka Media
Jl. Endro Suratmin, Pandawa Raya. No. 100
Korpri Jaya Sukarame Bandarlampung
082280035489
email : cspusakamedia@yahoo.com
Website : www.pusakamedia.com

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian
atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

KATA PENGANTAR

Kayu telah digunakan manusia selama ribuan tahun karena berbagai kelebihan seperti tampilannya yang indah dan alami, multifungsi, distribusi yang luas, kuat, mudah untuk diproses, dan merupakan bahan yang terbarukan. Kayu juga memiliki beberapa karakteristik alami yang kurang menguntungkan seperti ketidakstabilan terhadap kelembaban serta dapat terdegradasi oleh mikroorganisme, rayap, api, dan radiasi ultraviolet. Berbagai cara untuk menangani karakteristik yang kurang diinginkan dari kayu dapat diterapkan, misalnya melalui pengawetan kayu menggunakan formulasi bahan kimia beracun terhadap organisme perusak kayu atau dengan melapisi permukaan kayu dengan bahan aditif untuk mencegah penyerapan air dan efek dari radiasi sinar matahari yang menyebabkan penuaan kayu (*aging of wood*). Namun, penggunaan bahan kimia dalam proses perlakuan tersebut menimbulkan kekhawatiran terkait dengan potensi dampaknya terhadap lingkungan.

Modifikasi kayu dikembangkan untuk meningkatkan dan memperbaiki satu atau lebih kekurangan kayu dan menghindari dampak terhadap lingkungan ketika produk kayu termodifikasi digunakan. Perbaikan yang dimaksud seperti meningkatkan ketahanan terhadap pembusukan (*decay*), meningkatkan stabilitas dimensi, mengurangi serapan air, meningkatkan kekuatan kayu, dan

lain sebagainya. Teknologi modifikasi kayu secara umum dapat dikelompokan menjadi modifikasi kimiawi, modifikasi permukaan, modifikasi impregnasi, dan modifikasi panas. Teknologi-teknologi modifikasi tersebut berbeda dalam hal metode dan bahan yang digunakan dalam prosesnya namun dengan tujuan yang sama, terutama untuk meningkatkan stabilitas dimensi kayu dan meningkatkan ketahanan terhadap organisme perusak kayu seperti rayap dan jamur pelapuk kayu.

Buku ini lebih menitikberatkan pada pembahasan tentang modifikasi panas. Modifikasi panas didefinisikan sebagai aplikasi panas terhadap kayu untuk meningkatkan sifat alami kayu dan untuk memperoleh bentuk dan fungsionalitas kayu yang diinginkan tanpa merubah karakteristik ramah lingkungan kayu. Modifikasi panas merupakan salah satu teknologi modifikasi kayu yang paling maju secara komersial dibandingkan dengan teknologi modifikasi kayu lainnya. Hal ini terutama disebabkan karena penerapan teknologinya yang lebih sederhana dibandingkan dengan teknologi modifikasi kayu lainnya serta proses ini juga dinilai lebih ramah lingkungan, karena tidak menggunakan bahan kimia dalam proses atau perlakuan.

Penulis sangat mengharapkan masukan dan kritikan agar buku ini dapat menjadi lebih baik dan memberikan manfaat yang lebih luas kepada bidang ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya yang berkaitan dengan Ilmu Kayu dan Kehutanan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan berbagai bantuan untuk tersusunnya buku ini.

Bandar Lampung, 17 Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

I. PENDAHULUAN	1
1.1 Pentingnya Hutan dalam Kehidupan Manusia.....	1
1.2 Kondisi Hutan Dunia dan Indonesia	8
1.3 Produksi dan Kebutuhan Bahan Baku Kayu.....	12
1.4 Hasil Hutan Kayu: Keunggulan dan Kekurangannya	22
II. SEL KAYU DAN KOMPONEN KIMIA KAYU	24
2.1 Dinding Sel Kayu.....	24
2.2 Komposisi Kimia Kayu	26
2.2.1 Selulosa	27
2.2.2 Hemisolulosa.....	28
2.2.3 Lignin	30
2.3 Ekstraktif	31
2.4 Aksesibilitas Hidroksi.....	32
2.5 Hubungan Kayu dan Air	33
III. MODIFIKASI KAYU	37
3.1 Pengertian Modifikasi Kayu	37
3.2 Metode-Metode Modifikasi Kayu.....	39
3.2.1 Modifikasi Kimia	39

3.2.2 Modifikasi Impregnasi.....	41
3.2.3 Modifikasi Permukaan	43
3.2.4 Modifikasi Panas	44
IV. MODIFIKASI PANAS	45
4.1 Definisi	45
4.2 Sifat-sifat Kayu Termodifikasi Panas dan Potensi Penggunaan Produk.....	46
4.3 Perkembangan Teknologi Modifikasi Panas	48
4.4 Produk Modifikasi Panas Komersial.....	51
4.5.1 Thermowood	51
4.5.2 Plato Wood	53
4.5.3 Rectified Wood.....	55
4.5.4 Le Bois Perdure	56
4.5.5 Oil Heat Treatment.....	56
V. PENGARUH SUHU MODIFIKASI PANAS TERHADAP SIFAT-SIFAT KAYU.....	59
5.1 Pendahuluan	59
5.2 Evaluasi Sifat-Sifat Kayu.....	60
5.3 Perubahan Sifat Fisis	62
5.4 Perubahan Sifat Mekanis	65
VI. PENGARUH DURASI MODIFIKASI PANAS TERHADAP SIFAT-SIFAT KAYU.....	69
6.1 Pendahuluan	69
6.2 Evaluasi Sifat-Sifat Kayu.....	71
6.3 Perubahan Sifat Fisis	72
6.4 Perubahan Sifat Mekanis	77

VII. PENGARUH MODIFIKASI PANAS TERHADAP CACAT PENGERINGAN KAYU	82
7.1 Pendahuluan	82
7.2 Evaluasi Cacat Pengeringan.....	84
7.3 Retak Permukaan (<i>Surface Check</i>).....	87
7.4 Retak Ujung (<i>End Check</i>)	90
7.5 Perubahan Bentuk (<i>Distortion</i>)	94
VIII. PENGARUH MODIFIKASI PANAS TERHADAP PERUBAHAN WARNA.....	97
8.1 Warna Kayu	97
8.2 Pengukuran dan Evaluasi Warna Kayu.....	99
8.3 Perubahan Warna Kayu	101
8.4 Preferensi Konsumen Terhadap Warna Kayu Termodifikasi Panas	107
IX. PENUTUP	111
DAFTAR PUSTAKA.....	113

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Luas hutan dunia berdasarkan sub-kawasan tahun 1990-2015.....	8
Tabel 2. Luas kawasan hutan di Indonesia tahun 2011-2014	11
Tabel 3. Produksi dan konsumsi kayu bulat industri tahun 1965-2005.....	13
Tabel 4. Produksi dan konsumsi kayu gergajian tahun 1965-2005.....	14
Tabel 5. Produksi dan konsumsi produksi panel kayu tahun 1965-2005.....	15
Tabel 6. Produksi dan konsumsi kertas dan papan kertas tahun 1965-2005	16
Tabel 7. Metode modifikasi impregnasi kayu dan contoh aplikasinya	44
Tabel 8. Penelitian dan pengembangan kayu termodifikasi dari 1920- 2000an.....	49
Tabel 9. Perbandingan antara beberapa proses modifikasi panas komersial	58
Tabel 10. Pengaruh suhu dan metode klem terhadap sifat fisik kayu okan.....	64
Tabel 11. Pengaruh suhu dan metode klem terhadap sifat mekanis kayu okan.....	66

Tabel 12. Pengaruh durasi perlakuan dan metode penumpukan dengan klem terhadap sifat fisik kayu okan	72
Tabel 13. Tingkat perubahan warna (ΔE^*) setelah modifikasi panas	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Siklus air dari atmosfer ke bumi dan kembali ke atmosfer melalui kondensasi, presipitasi, evaporasi dan transpirasi.....	3
Gambar 2. Penanaman hutan di sekeliling lahan pertanian sebagai penahan angin (<i>windbreak</i>). <i>Windbreak</i> mampu meningkatkan produktivitas pertanian sebesar 10-20%	4
Gambar 3. Ekowisata di Taman Nasional Way Kambas, Lampung	7
Gambar 4. Produksi domestik bruto (PDB) global periode 1970-2030	17
Gambar 5. Kondisi saat ini dan proyeksi area hutan tanaman di 61 negara.....	18
Gambar 6. Kondisi saat ini dan proyeksi produksi kayu dari hutan tanaman di 61 negara	19
Gambar 7. Produksi bahan bakar dari kayu.....	20
Gambar 8. Contoh teknologi pemanfaatan kayu terkini: kayu sebagai bahan produksi nanoselulosa dan potensi pemanfaatannya	21
Gambar 9. Pelapisan pada dinding sel kayu dewasa	25

Gambar 10. Proses fotosintesis	27
Gambar 11. Struktur molekular hemiselulosa	29
Gambar 12. Struktur molekular lignin pada kayu lunak.....	31
Gambar 13. Ilustrasi keberadaan air pada rongga sel (cell lumen) dan dinding sel (cell wall) kayu (Kanan ke Kiri): 1) kayu basah (<i>green wood</i>), kadar air >80%; 2) kadar air di atas titik jenuh serat (<i>fiber saturation point/FSP</i>); 3) titik jenuh serat (FSP), kadar air 30%; 4) kadar air di bawah FSP.....	35
Gambar 15. Diagram proses produksi Thermowood	52
Gambar 16. Skema proses modifikasi panas Plato Wood	54
Gambar 17. Skema proses modifikasi panas Oil Heat Treatment: (a) pemasukan kayu dan minyak nabati, (b) pemanasan dalam minyak, (c) pendinginan dan pengeluran minyak	57
Gambar 18. Susunan kayu: (a) dengan klem logam (<i>with clamp</i>), dan (b) tanpa klem (<i>without clamp</i>)	60
Gambar 19. Hubungan antara penurunan berat badan dengan kerapatan dan penyusutan volume pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas	75
Gambar 20. Hubungan antara ΔE^* dengan kerapatan dan penyusutan volume pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas	75
Gambar 21. Pengaruh durasi perlakuan dan metode penumpukan dengan klem selama perlakuan panas terhadap EMC dan WA	76
Gambar 22. Hubungan antara kehilangan berat dengan EMC dan WA pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas	77

Gambar 23. Hubungan antara ΔE^* dengan EMC dan WA pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas.....	77
Gambar 24. Pengaruh durasi perlakuan dan metode penumpukan dengan klem selama perlakuan panas terhadap MOR dan MOE	78
Gambar 25. Difraktogram sinar-X kayu okan sebelum dan sesudah perlakuan panas.....	79
Gambar 26. Hubungan antara kehilangan berat dengan MOR dan MOE pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas	80
Gambar 27. Hubungan antara ΔE^* dengan MOR dan MOE pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas.....	81
Gambar 28. Ilustrasi penampang melintang sampel berdasarkan tipe pemotongan papan yang digunakan dalam proses modifikasi panas	84
Gambar 29. Ilustrasi cacat pengeringan: (a) cacat permukaan dan (b) cacat ujung.....	86
Gambar 30. Pengukuran distorsi pengeringan: (a) <i>bow</i> , (b) <i>cup</i> , dan (c) <i>twist</i>	86
Gambar 31. Jumlah rata-rata retak permukaan setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	88
Gambar 32. Panjang rata-rata retak permukaan setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	89
Gambar 33. Retak permukaan pada kayu gubal setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	90
Gambar 34. Retak permukaan pada kayu teras setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	90
Gambar 35. Jumlah rata-rata retak ujung setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan.....	91

Gambar 36. Panjang rata-rata retak ujung setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan.....	92
Gambar 37. Retak ujung pada kayu gubal setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan.....	92
Gambar 38. Retak ujung pada kayu teras setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan.....	93
Gambar 39. Gambar SEM menunjukkan retak ujung pada kayu gubal dan kayu teras setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan.....	93
Gambar 40. Rata-rata defleksi tertinggi cacat <i>bow</i> setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	95
Gambar 41. Rata-rata defleksi tertinggi cacat <i>cup</i> setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	95
Gambar 42. Rata-rata defleksi tertinggi cacat <i>twist</i> setelah modifikasi panas pada berbagai suhu perlakuan..	96
Gambar 43. Penyusunan sampel selama modifikasi panas: (a) dengan klem metal dan (b) tanpa klem.....	100
Gambar 44. Warna kayu pinus Korea dan paulownia sebelum dan sesudah modifikasi panas dengan klem pada suhu yang berbeda	102
Gambar 45. Pengaruh suhu dan metode penumpukan dengan klem terhadap parameter warna L^*	102
Gambar 46. Pengaruh suhu dan metode penumpukan dengan klem terhadap parameter warna a^*	103
Gambar 47. Pengaruh suhu dan metode penumpukan dengan klem terhadap parameter warna b^*	104
Gambar 48. Pengaruh suhu dan metode penumpukan dengan klem terhadap perubahan warna (ΔE^*) ...	105
Gambar 49. Preferensi konsumen keseluruhan terhadap warna kayu pinus Korea dan paulownia.....	108

Gambar 50. Preferensi konsumen berdasarkan jenis kelamin terhadap warna kayu pinus Korea dan paulownia.....	108
Gambar 51. Preferensi konsumen berdasarkan usia terhadap warna kayu pinus Korea dan paulownia.....	109

IX.

PENUTUP

Pengaruh suhu pada perubahan komponen kayu dapat digambarkan sebagai berikut: selama pengeringan dalam interval 40°C-90°C, beberapa perubahan kimia kecil mungkin mulai terjadi, kemungkinan ekstraksi tertentu. Untuk pengeringan suhu tinggi dalam interval 90°C-150°C, perubahan untuk semua komponen kayu lebih jelas. Pada suhu 150°C - 250°C, perubahan besar pada komponen kayu terjadi, baik degradasi maupun modifikasi, dan pada suhu di atas 250°C proses karbonisasi umumnya terjadi dengan pembentukan CO₂ dan produk pirolisis lainnya.

Perlakuan panas kayu mengubah komposisi kimia kayu dengan merendahkan senyawa dinding sel dan ekstraktif. Ekstraksi dalam kayu lebih mudah terdegradasi, dan senyawa ini menguap dari kayu selama perlakuan panas. Hemiselulosa adalah senyawa struktural pertama yang terpengaruh secara termal. Selulosa dan lignin terdegradasi lebih lambat dan pada suhu yang lebih tinggi daripada hemiselulosa.

Perubahan sifat-sifat kayu akibat modifikasi komponen kimia kayu oleh modifikasi panas terutama perubahan warna, peningkatan stabilitas dimensi kayu, serta ketahanan kayu terhadap organisme perusak kayu seperti rayap dan jamur pelapuk kayu. Perubahan sifat fisis dan biologis kayu oleh perlakuan panas memperluas potensi penggunaan kayu untuk berbagai aplikasi.

Terlepas dari keunggulannya, salah satu kekurangan modifikasi panas kayu adalah kecenderungan penurunan kekuatan kayu akibat modifikasi panas. Penurunan sifat mekanis kayu sangat dipengaruhi oleh faktor kunci proses terutama suhu perlakuan maksimum, laju pemanasan (*heating rate*), durasi pada suhu maksimum (*holding time*), dan medium pemanasan. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan teknologi modifikasi panas terutama penentuan kombinasi faktor kunci sangat penting dilakukan untuk memperoleh hasil modifikasi panas yang optimal, yaitu peningkatan stabilitas dimensi dan sifat-sifat fisis kayu dengan pengurangan kekuatan kayu yang diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrohim, S., Mandang, Y. I., dan Sutisna, U. 2004. Atlas Kayu Indonesia Jilid III. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan. Bogor, Indonesia.
- Abdul-Kader, R., dan Sahri, M. H. 1993. *Properties and utilization*. Dalam: Awang, K. dan Taylor, D. (Penyunting). 1993. *Acacia Mangium, growing and utilization. MPTS Monograph Series No. 3*. Winrock International and FAO. Bangkok, Thailand. Pp. 225–241.
- Allegretti, O., Brunetti, M., Cuccui, I., Ferrari, S., Nocetti, M., and Terziev, N. 2012. Thermo-vacuum modification of spruce (*Picea abies* Karst.) and fir (*Abies alba* Mill.) wood. BioResources. 7(3): 3656-3669.
- Aydemir, D., Gunduz, G., and Ozden, S. 2012. The influence of thermal treatment on color response of wood materials. Color Res. Appl. 37(2): 148-153.
- Awoyemi, L., and Jones, I.P. 2011. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. Wood Sci. Tech. 45(2): 261-267.

- Ayensu, E.S. and Bentum, A. 1974. Commercial timbers of West Africa, Smithsonian Contributions to Botany Number 14, Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Aytin, A., Korkut, S., Ünsal, Ö., and Çakıcıer, N. 2015. The effects of heat treatment with the ThermoWood method on the equilibrium moisture content and dimensional stability of wild cherry wood. *BioResources*. 10(2): 2083-2093.
- Bailey, I. W. 1952. Biological Processes in the Formation of Wood. *Science*, 115: 255-259.
- Bekhta, P., and Niemz, P. 2003. Effect of high temperature on the change in colour, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*. 57(5): 539-546.
- Boonstra, M.J., Van Acker, J., Kegel, E., and Stevens, M. 2007a. Optimisation of a two-stage heat treatment process: Durability aspects. *Wood Sci. Technol.* 41(1): 31-57.
- Boonstra, M.J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B.F., and Kegel, E.V. 2007b. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Ann. For. Sci.* 64(7): 679-690.
- Boonstra, M.J. 2008. A two-stage thermal modification of wood. Ph.D. dissertation in cosupervision Ghent University and Université Henry Poincaré, Nancy 1.
- Brischke, C., Welzbacher, C.R., Brandt, K., and Rapp, A.O. 2007. Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE $L^*a^*b^*$ color data on homogenized wood samples. *Holzforschung*. 61: 19-22.
- Byeon, H. S., Park, J. H., Hwang, K. K., Park, H. M., Park, B. S., and Chong, S. H. 2010. Sound absorption property of heat-

- treated wood at a low temperature and vacuum conditions. J. Korean Wood Sci. & Tech. 38(2): 101-107.
- Candelier, K., Dumarçay, S., Petrissans, A., Gérardin, P., and Petrissans, M. 2013. Comparison of mechanical properties of heat treated beech wood cured under nitrogen or vacuum. Polym. Degrad. Stabil. 98(9): 1762-1765.
- Candelier, K., Thevenon, M.F., Petrissans, A., Dumarçay, S., Gerardin, P., and Petrissans, M. 2016. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: A review. Ann. For. Sci. 73(3): 571-583.
- Cao, Y., Jiang, J., Lu, J., Huang, R., Jiang, J., and Wu, Y. 2012a. Color change of Chinese fir through steam-heat treatment. BioResources. 7(3): 2809-2819.
- Cao, Y., Lu, J., Huang, R., Zhao, X., and Jiang, J. 2012b. "Effect of steam-heat treatment on mechanical properties of Chinese fir," BioResources 7(1), 1123-1133.
- Carle, J., and Holmgreen, P. 2008. Wood from Planted Forests: A Global Outlook 2005-2030. Forest Product Journal. 58(12): 6-18.
- Chang, Y.S., Han, Y.J., Eom, C.D., Park, J.S., Park, M.J., Choi, I.G., Yeo, H.M. 2012. Analysis of factors affecting the hygroscopic performance of thermally treated *Pinus koraiensis* wood. J. Korean Wood Sci. Technol. 40(1): 10-18.
- Chapotin S.M., Razanameharizaka J.H., Holbrook N.M. 2006. Water relations of baobab trees (*Adansonia* spp. L.) during the rainy season: does stem water buffer daily water deficits?. Plant, Cell, and Environment. 29(6): 1021–1032.

- Chudnoff, M. 1984. Tropical timbers of the World, Agriculture Handbook Number 607, US Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Cui, W., Kamdem, D. P., Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood and Fiber Sci.* 36(3): 291-301.
- Ding, T., Gu, L., and Li, T. 2011. Influence of steam pressure on physical and mechanical properties of heat-treated Mongolian pine lumber. *Euro. J. Wood Prod.* 69(1): 121-126.
- Dubey, M. J., Pang, S., and Walker, J. 2012. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. Don wood with oil heat-treatment. *Holzforschung*. 66(1): 49-57.
- Dumanauw, J. F. 2001. Mengenal Kayu. Penerbit Kanisius. Yogyakarta.
- Esteves, B.M., Domingos, I., Pereira, H. 2008. Pine modification by heat treatment in air. *BioResources*. 3(1): 142-154.
- Esteves, B.M., Pereira, H. 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*. 4(1): 340-404.
- Esteves, B. M., and Pereira, H. 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*. 4(1): 340-404.
- Esteves, B. M., Nunes, L., Domingos, I., and Pereira, H. 2014. Comparison between heat treated sapwood and heartwood from *Pinus pinaster*. *Euro. J. Wood Prod.* 72(1): 53-60.
- FAO. 2009. State of the World's Forests 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.

- FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment 2010—Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FAO. 2014a. State of the World's Forests: Enhancing the socioeconomic benefits from forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FAO. 2014b. Contribution of the forestry sector to national economies, 1990-2011, by A. Lebedys and Y. Li. Forest Finance Working Paper FSFM/ACC/09. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- Forest Watch Indonesia. 2009. Potret Keadaan Hutan Indonesia Periode Tahun 2000-2009. Bogor. Indonesia.
- Ganne-Chedeville, C., Jaaskelainen, A.S., Froidevaux, J., Hughes, M., Navi, P. 2012. Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVRR spectroscopy. *Holzforschung*. 66(2):163-170.
- Glass, S.V., Zelinka, S.L. 2010. Chapter 4: Moisture relations and physical properties of wood. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Gonzalez-Pena, M.M., and Hale, M.D.C. 2009a. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes. *Holzforschung*. 63(4): 385–393.
- Gonzalez-Pena, M.M., and Hale, M.D.C. 2009b. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 2: Property predictions from color changes. *Holzforschung*. 63(4): 394-401.

- Grinchik, N.N., Adamovich, A.L., Kizina, O.A., and Kharma, U.M. 2015. Modeling of heat and moisture transfer in wood in finish drying by the energy of a microwave field. *J. Eng. Phys. Thermophy.* 88(1): 35-41.
- Hanhijarvi, A., Wahl, P., Rasanen, J., and Silvennoinen. 2003. Observation of development of microcracks on wood surface caused by drying stresses. *Holzforschung.* 57(5): 561-565.
- Hakkou, M., Pétrissans, M., Zoulalian, A., and Gérardin, P. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polym. Degrad. Stab.* 89(1): 1-5.
- Hakkou, M., Pétrissans, M., Gérardin, P., and Zoulalian, A. 2006. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polym. Degrad. Stab.* 91(2): 393-397.
- He, Q., and Wang, X. 2015. Drying stress relaxation of wood subjected to microwave radiation. *BioResources.* 10(3): 4441-4452.
- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2015a. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylindrodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. *BioResources.* 10(4): 6961-6974.
- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Febrianto, F., and Kim, N.H. 2015b. Drying defects of Okan wood (*Cylindrodiscus gabunensis*) heat-treated at different temperatures, in: Proceedings from the 65th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Tokyo, Japan, pp. 144.

- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2016. Effect of treatment duration and clamping on the properties of heat-treated okan wood. BioResources. 11(4): 10070-10086.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., and Kim, N.H. 2017a. Effect of mechanical restraint on drying defects reduction in heat-treated okan wood. BioResources. 12(4): 7452-7465.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Park, B. H., Banuwa, I. S. B., Febrianto, F., and Kim, N.H. 2017b. Color change and consumer preferences towards color of heat-treated Korean white pine and royal paulownia woods. J. Korean Wood Sci. Technol. 45(2): 213-222.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., and Kim, N.H. 2017c. Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* woods. Bioresources. 12(4): 7539-7551.
- Hill, C.A.S. 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley Series in Renewable Resources, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, England.
- Hoadley, R.B. 2000. Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology, The Taunton Press, Newtown, Connecticut.
- Hoibo, O., Nyrud, A.Q. 2010. Consumer perception of wood surfaces: the relationship between stated preferences and visual homogeneity. J. Wood Sci. 56(4): 276-283.
- Hwang, S.W., Cho, B.G., Lee, W.H. 2015. Hardness and dimensional stability of thermally compressed domestic Korean pine. J. Korean Wood Sci. Technol. 43(1): 68-75.

- Jämsä, S., and Viitaniemi, P. 2001. Heat treatment of wood: Better durability without chemicals, in: Proceedings of special seminar held in Antibes, France.
- Jiang, J., Lu, J., Zhou, Y., Huang, R., Zhao, Y., and Jiang, J. 2014. Optimization of processing variables during heat treatment of oak (*Quercus mongolica*) wood. *Wood Sci. Technol.* 48(2): 253-267.
- Johanson, A., Fhyr, C., and Rasmuson, A. 1997. High temperature convective drying of wood chips with air and superheated steam. *Int. J. Heat Mass Transf.* 40(12): 2843-2858.
- Kadiri, A. B., Olowokudejo, J. D., and Ogundipe, O. T. 2005. Some aspects of foliar epidermal morphology of *Cylcodiscus gabunensis* (Taub.) Harms (Mimosaceae). *J. Sci. Res. Dev.* 10: 33-38.
- Kamdem, D., Pizzi, A., and Jermannaud, A. 2002. Durability of heat-treated wood. *Holz. Roh-Werkst.* 60(1): 1-6.
- Kariz, M., Kuzman, M. K., and Sernek, M. 2013. The effect of heat treatment on the withdrawal capacity of screws in spruce wood. *BioResources*. 8(3): 4340-4348.
- Kasemsiri, P., Hiziroglu, S., and Rimdusit, S. 2012. Characterization of heat treated eastern redcedar (*Juniperus virginiana* L.). *J. Mater. Process. Tech.* 212(6): 1324-1330.
- Keenan, R. J., Reams, G.A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., dan Lindquist, E. 2015. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*. 352: 9–20.
- Keey, R.B., Langrish, T.A.G., and Walker, J.C.F. 2000. Kiln-drying of lumber. Springer Berlin, Germany.

Kementerian Kehutanan Republik Indonesia. 2014. Statistik Kementerian Kehutanan 2013. Kemenetrian Kehutanan, Jakarta. Indonesia.

Kim, C.H., Kang, C.W., Kang, S.G., and Kang, H.Y. 2012. Effect of pretreatments on reducing surface cracks of heat-treated western hemlock roundwoods. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 40(5): 343-351.

Kim, Y.S. 2016. Research trend of the heat-treatment of wood for improvement of dimensional stability and resistance to biological degradation. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 44(3): 457-476.

Kocae, D., Shi, J. L., Yang, D. Q., and Bouazara, M. 2008a. Mechanical properties, dimensional stability, and mold resistance of heat-treated jack pine and aspen. *Forest Prod. J.* 58(6): 88-93.

Kocae, D., Poncsak, S., and Boluk, Y. 2008b. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*. 3(2): 517-537.

Kohli, R. K., Batish, D. R., dan Singh, H. P. 2009. Important Tree Species. Dalam: Owens, J. N. and Lund, H. G. (Eds.). 2009. Forests and Forest Plants Volume II: Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers/ UNESCO. Oxpord, UK.

Kollmann, F.F.P., and Sachs, I.B. (1967). "The effects of elevated temperature on certain wood cells," *Wood Sci. Technol.* 1(1): 14-25.

Krisdianto, Barly, Abdurrohim, S., and Mandang, Y. I. 2013. Atlas Kayu Indonesia Jilid IV. Badan Penelitian dan

Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan. Bogor, Indonesia.

- KSA. KS F 2198. 2011. Determination of density and specific gravity of wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KSA. KS F 2199. 2011. Determination of moisture content of wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KSA. KS F 2203. 2009. Method of shrinkage test for wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KSA. KS F 2204. 2009. Method of test for water absorption of wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KSA. KS F 2206. 2009. Method of compression test for wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- KSA. KS F 2209. 2009. Method of shear test for wood. Korean Standards Association, Seoul, Korea.
- Kranitz, K., Sonderegger, W., Bues, CT., Niemz, P. 2016. Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Sci. Technol.* 50(1): 7-22.
- Kubojima, Y., Okano, T., and Ohta, M. 1998. Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas. *J. Wood Sci.* 44(1): 73-77.
- Kubojima, Y., Okano, T., and Ohta, M. 2000. Bending strength and toughness of heat-treated wood. *J. Wood Sci.* 46(1): 8-15.
- Lee, W.H., Lim, H.M., Kang, H.Y. 2015. The color change of korean pine specimens oil-heat-treated at 180 and 200°C. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 43(4): 438-445.
- Liu, J. X., and Wang, X. M. 2016. Effect of drying temperature and relative humidity on contraction stress in wood. *BioResources*. 11(3): 6625-6638.

- Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A., and Brink, M. (Eds). 2008. Plant Resources of Tropical Africa 7(1): Timber 1, PROTA Foundation, Backhuys Publishers, Wageningen, Netherlands.
- Martawijaya, A., Kartasujana, I., Kadir, K., dan Prawira, S. A. 2005. Atlas Kayu Indonesia Jilid I (Cetakan ketiga). Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan. Bogor, Indonesia.
- Martawijaya, A., Kartasujana, I., Mandang, Y. I., Prawira, S. A., and Kadir, K. 1989. Indonesian Wood Atlas, Volume II. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan. Bogor, Indonesia.
- Matsuo, M., Yokoyama, M., Umemura, K., Sugiyama, J., Kawai, S., Gril, J., Kubodera, S., Mitsutani, T., Ozaki, H., Sakamoto, M., and Imamura, M. 2011. Aging of wood: Analysis of color changes during natural aging and heat treatment. *Holzforschung*. 65: 361-368.
- McDonald, A.G., Fernandez, M., Kreber, B., and Laytner, F. 2000. The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine. *Holzforschung* 54(1): 12-22.
- Metsa-Kortelainen, S., Antikainen, T., and Viitaniemi, P. 2006. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. *Holz. Roh-Werkst.* 64: 192-197.
- Ministry of Environment, 2009. Fourth National Report on the Convention on Biological Biodiversity. Jakarta: Biodiversity Conservation Unit, Ministry of Environment.
- Mitsui, K., Takada, H., Sugiyama, M., Hasegawa, R. 2001. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment:

Part 1 Effect of treatment conditions on the change in color.
Holzforschung 55(6): 601-605.

Morén, T. J. 1989. Check formation during low temperature drying on Scots pine: Theoretical considerations and some experimental results, in: Proceedings of the IUFRO International Wood Drying Symposium, Seattle, Washington, USA.

Mugabi, P., Rypstra, T., Vermaas, H.F., and Nel, D.G. 2010. Relationships between drying defect parameters and some growth characteristics in kiln-dried South African grown *Eucalyptus grandis* poles. *J. Eur. J. Wood Prod.* 68(3): 329-340.

Oltean, L., Teischinger, A., and Hansmann, C. 2007. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying –A review. *BioResources*. 2(4): 789-811.

Pandey, K.K., Vuorinen, T. 2008. Comparative study of photodegradation of wood by a UV laser and a xenon light source. *Polymer Degrad. Stabil.* 93(12): 2138-2146.

Pang, S., Langrish, T. A. G., and Keey, R. B. 1994. Moisture movement in softwood timber at elevated temperatures. *Dry Technol.* 12(8): 1897-1914.

Panshin, A. J., and de Zeeuw, C. 1980. *Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada*, 4th Ed., McGraw-Hill, New York.

Park, S.H., Jang, J.H., Qi, Y., Hidayat, W., Hwang, W.J., Febrianto, F., Kim, N.H. 2016. Color change of major wood species planted in Indonesia by ultraviolet radiation. *J. Korean Wood Sc. Technol.* 44(2): 172-183.

- Poncsak, S., Kocaebe, D., Bouazara, M., and Pichette, A. 2006. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Sci. Tech.* 40(8): 647-663.
- Ross, R. J. 2010. Wood handbook: Wood as an engineering material," *General Technical Report FPL-GTR-190*, Centennial Ed., Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, WI, (http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf).
- Salca, E.A., Kobori, H., Inagaki, T., Kojima, Y., Suzuki, S. 2016. Effect of heat treatment on colour changes of black alder and beech veneers. *J. Wood Sci.* 62(4): 297-304.
- Sandoval-Torres, S., Jomaa, W., Marc, F., and Puiggali, J.R. 2010. Causes of color changes in wood during drying. *For. Stud. China.* 12(4): 167-175.
- Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., and Conrad, C. M. 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Text. Res. J.* 29(10): 786-794.
- Shi, J. L., Kocaebe, D., and Zhang, J. 2007. Mechanical behavior of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz Roh. Werkst.* 65(4): 255-259.
- Shi, Q., Bao, F. C., Lu, J. X., and Jiang, J. H. 2011. Effect of heat treatment temperature on the colour of Okan wood. *Adv. Mater. Res.* 214(1): 531-534.
- Shi, Q., and Jiang, J. H. 2011. Colour stability of heat-treated Okan sapwood during artificial weathering. *Adv. Mater. Res.* 197: 13-16.

- Shmulsky, R., and Jones, P. D. 2011. Forest Products and Wood Science: An Introduction, 6th Ed., Wiley-Blackwell, England.
- Simpson, W. T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual, Chapter 2. Kiln Types and Features, Forest Products Laboratory, Madison, 198, pp. 43-73.
- Sundqvist, B. 2002. Color response of Scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula pubescens*) subjected to heat treatment in capillary phase. Holz Roh Werkst 60: 106-114.
- Thiam, M., Milota, M.R., and Leichti, R. 2002. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of western hemlock lumber. Forest Prod. J. 52(4): 64-68.
- Timell, T. E. 1967. Recent progress in the chemistry of wood hemicelluloses. Wood Science and Technology. 1(1): 45-70.
- Todaro, L., Dichicco, P., Moretti, N., and D'Auria, M. 2013. Effect of combined steam and heat treatments on extractives and lignin in sapwood and heartwood of turkey oak (*Quercus cerris* L.) wood. BioResources. 8(2): 1718-1730.
- Valverde, J.C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. Color Res. Appl. 39(5): 519-529.
- Weiland, J. J., and Guyonnet, R. 2003. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. Holz. Roh- Werkst. 61(3), 216-220.
- Willem, W., Altgen, M., and Militz, H. 2015. Comparison of EMC and durability of heat treated wood from high *versus* low

- water vapour pressure reactor systems. Int. Wood Prod. J. 6(1): 21-26.
- Won, K. R., Kim, T. H., Hwang, K. K., Chong, S. H., Hong, N. E., and Byeon, H. S. 2012. Effect of heat treatment on the bending strength and hardness of wood. J. Korean Wood Sci. Technol. 40(5): 303-310.
- Won, K.R., Hong, N.E., Park, H.M., Moon, S.O., Byeon, H.S. 2015. Effects of heating temperature and time on the mechanical properties of heat-treated woods. J. Korean Wood Sci. Technol. 43(2): 168-176.
- Xing, D., and Li, J. 2014. Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of *Larix spp.* wood. BioResources. 9(3): 4274-4287.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel. 86(12): 1781-1788.
- Yildiz, S., Gezer, E. D., and Yildiz, U. C. 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. Build. Environ. 41(12): 1762-1766.
- Zanuncio, A. J. V., Motta, J. P., da Silveira, T. A., Farias, E. D. S., and Trugilho, P. F. 2014. Physical and colorimetric changes in *Eucalyptus grandis* wood after heat treatment. BioResources. 9(1): 293-302.
- Zhang, T.T., Tu, D., Peng, C., and Zhang, X. 2015. Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of *Eucalyptus regnans*. BioResources. 10(2): 3531-3540.