

Aplikasi Isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ untuk Lacak Balak Kayu Jati (*Tectona grandis* Linn.f.) di Jawa

Application of Isotopes $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for Teak Wood (*Tectona grandis* Linn.f.) Timber Tracking in Java

Agus Kholik, Djiono, Iskandar Z. Siregar, Ulfah J. Siregar, Lina Karlinasari dan Tedi Yunanto

Abstract

Tracking the origin of Teak timber and its wood product is possible to be carried out using stable isotopes fingerprinting. To enrich the available variation patterns, Teak woods samples were collected from nine Forest Management Units (FMUs) representing all provinces and Teak centres in Java. Mills from all part of woods were mixed for analyses. The mills were burned under vacuum in a reactor system at 1200°C for 2 h, the resulting clean CO_2 was transferred to the mass spectrometer to determine its isotopic composition of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$. The generated data was then analysed using multivariate analysis. The results showed that isotopes analysis grouped Teak populations in Java into West Java population and mixed Central-East Java population. To consider wood as material for fingerprinting traded forest product, a refinement on method should be done.

Key words: Teak, isotopes, timber tracking, Java

Pendahuluan

Sertifikasi lacak balak (*chain of custody*, CoC) merupakan salah satu kegiatan utama sertifikasi ekolabel untuk memantau aliran kayu dari hutan ke pabrik. Lacak balak lebih dikenal dengan *timber tracking*, tetapi dalam konteks sertifikasi istilahnya adalah CoC. Beberapa jenis kayu yang sedang menuju proses sertifikasi ekolabel di Indonesia adalah Jati, Merbau, Meranti, Ramin, Ekaliptus dan Mangium. Jati menjadi salah satu prioritas sertifikasi karena harganya yang mahal, permintaannya yang tinggi baik domestik maupun internasional serta adanya tuntutan konsumen akan produk Jati yang ramah lingkungan. Sertifikasi lacak balak menuntut adanya suatu prosedur dokumentasi aliran kayu yang dapat diandalkan. Akan tetapi prosedur dokumentasi ini belum dilengkapi dengan metode pembuktian yang akurat untuk memecahkan kasus asal-usul kayu yang meragukan.

Penggunaan penanda isotop merupakan metode baru yang mungkin dapat dikembangkan dan diterapkan di masa datang untuk sertifikasi lacak balak dan pembuktian kasus kejahatan hutan, seperti *illegal logging*. Penanda tersebut bersifat internal yang melekat dalam materi dasar kayu sehingga sulit dimanipulasi. Baik di laboratorium maupun di lapangan, tanaman dapat diekspose dengan suatu pengayaan karbon $\delta^{13}\text{C}$ dan oksigen $\delta^{18}\text{O}$ anorganik (Ehleringer dan Osmond 1991). Penelitian terakhir telah menunjukkan penggunaan isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{15}\text{N}$ dapat membedakan orang dari Eropa dengan Amerika (Augenstein dan Liu 2003); penelusuran asal-usul burung (Hobson 2007); ikan (Trueman dan Moore 2007) dan isotop stabil dari kayu sebagai indikator perubahan ekologis (Dawson dan Siegwolf 2007).

Variasi kandungan isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dalam kayu Jati diduga sebagai suatu refleksi isotop yang dihasilkan dari sumber nutrisi dan air yang dikonsumsi selama pembentukan jaringan kayu, dimana mencerminkan pula kondisi lingkungan dan geografis asal kayu Jati. Dengan kata lain, faktor lingkungan dan geografis mempengaruhi penanda isotop kayu Jati sehingga dapat digunakan untuk kepentingan lacak balak. Dalam kasus tidak adanya bahan perbandingan DNA dan tidak ditemukannya kecocokan DNA, maka isotop dapat membantu identifikasi dan pembuktian legalitas kayu Jati.

Dari hal tersebut di atas maka upaya eksplorasi isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dilakukan terhadap komposit kayu Jati dari tiap lokasi sentra Jati di Jawa. Penggunaan komposit kayu memiliki kepraktisan tanpa preparasi contoh uji dan akurasi yang sama kuat dengan contoh uji dari bahan selulosa ataupun lignin untuk kepentingan analisis isotop kayu dalam merekonstruksi iklim (Loader *et al.* 2003). Variasi isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ kayu Jati tersebut selanjutnya dianalisis lebih lanjut untuk melihat kemungkinan penggunaannya untuk lacak balak.

Metodologi

Koleksi Contoh Uji

Contoh uji kayu diperoleh dari sembilan lokasi Kesatuan Pemangkuan Hutan (KPH) Perum Perhutani yang masih produktif dan merupakan sentra Jati utama di Jawa, yaitu Jawa Barat-Banten, Jawa Tengah dan Jawa Timur. KPH Perum Perhutani yang dipilih sebagai populasi adalah i) Unit I Jawa Tengah: KPH Cepu, KPH Kendal, KPH Kebonharjo dan KPH Randublatung, ii) Unit II Jawa Timur: KPH Bojonegoro dan KPH Ngawi dan

iii) Unit III Jawa Barat-Banten: KPH Banten, KPH Indramayu dan KPH Ciamis. Sebanyak lima individu pohon masak tebang (umur > 30 tahun) dipilih secara acak dari areal tebangan pada tiap KPH terpilih untuk diambil contoh uji kayunya dalam bentuk piringan.

Analisis Isotop

Analisis isotop dilakukan di Laboratorium Pengujian Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi (PATIR) BATAN, Jakarta. Serbuk kayu berukuran 40 – 60 mesh dalam bentuk komposit dari lima contoh uji kayu Jati dari masing-masing lokasi, digunakan untuk mengetahui kandungan isotop karbon ($\delta^{13}\text{C}$) dan oksigen ($\delta^{18}\text{O}$). Preparasi gas CO_2 dilakukan dengan metode pembakaran (Ehleringer *et al.* 2007). Contoh uji serbuk kayu sebanyak 70 mg dioksidasi dengan 70 mg Cu_2O pada suhu 1200°C selama 2 jam dalam alat *sulphate preparation line*. Proses pembakaran berlangsung dalam kondisi vakum. Sesudah reaksi sempurna, gas CO_2 yang terbentuk dipisahkan dengan uap air dengan metode *trapping* menggunakan *dry ice acetone* dan nitrogen cair. Gas CO_2 hasil pembakaran diinjeksikan dan diukur dengan menggunakan spektrometer massa SIRA-9 (Djiono *et al.* 1996). Hasil pengukuran berupa rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ terhadap gas CO_2 pembandingan yang juga dialirkan ke spektrometer massa tersebut. Selanjutnya nilai tersebut distandarkan terhadap standar *Pee Dee Belemnite* (PDB) dan dituliskan dengan notasi $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dalam satuan per mill (‰). Nilai rasio isotop tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan

metode *Principal Component Analysis* (PCA) dengan perangkat lunak Minitab 13 untuk melihat keragaman geografis.

Hasil dan Pembahasan

Contoh uji kayu Jati diperoleh dari berbagai kelas umur, variasi letak geografis dan topografi hutan tanaman Jati milik Perum Perhutani di Jawa seperti pada Tabel 1. Adapun hasil analisis isotop disajikan dalam Gambar 1. Nilai rata-rata isotop $\delta^{13}\text{C}$ sebesar -14.83‰ (-23.94 sampai -8.10‰) sedangkan Isotop $\delta^{18}\text{O}$ nilai rata-ratanya sebesar 17.62‰ (8.95 sampai 27.33‰). Menurut klasifikasi Smith dan Eipstein (1971) kisaran nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ tersebut termasuk kategori tinggi untuk tanaman berkayu (*higher plant*).

Secara umum nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ pada kayu Jati bervariasi antar lokasi dimana contoh uji kayu diperoleh. Rasio isotop $\delta^{13}\text{C}$ dari kayu Jati lebih rendah dari rasio isotop $\delta^{13}\text{C}$ di atmosfer (-8‰ PDB), sedangkan untuk isotop $\delta^{18}\text{O}$ nilainya lebih tinggi dari rasio isotop dalam air hujan (-8‰ SMOW, *Standard Mean Ocean Water*) yang mengindikasikan bahwa tanaman mengadakan diskriminasi atau perubahan isotop selama pembentukan kayu. Perbedaan tersebut disebabkan oleh efek kinetik selama berlangsungnya fotosintesis yang menyebabkan pemiskinan $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 dan pengayaan $\delta^{18}\text{O}$ oleh pertukaran kimia dalam sistem fotosintesis yang tertinggal dan terkonsentrasi pada sintesa bahan organik (Dijiono *et al.* 1996; Dawson dan Siegwolf 2007).

Table 1. Detail locations of Teak wood sample collection in Java.

Units	Locations (FMUs)	Age Class (AC)	Number of Teak Samples	Geographic Positions	Height (m ASL)
West Java-Banten	Banten	IV (30-40 yrs)	5	06°36'37.4"S ~ 105°45'44.9"E	69
	Ciamis	IV (30-40 yrs)	5	07°20'20.3"S ~ 108°31'45.2"E	100
	Indramayu	IV (30-40 yrs)	5	06°36'49.0"S ~ 107°58'54.5"E	95
Central Java	Kendal	V (50-60 yrs)	5	07°01'19.6"S ~ 110°15'51.9"E	116
	Cepu	IV (30-40 yrs)	5	07°02'53.1"S ~ 111°32'00.8"E	169
	Randublatung	IV (30-40 yrs)	5	07°06'04.7"S ~ 111°26'06.7"E	128
	Kebonharjo	VII (70-80 yrs)	5	06°49'41.8"S ~ 111°36'02.9"E	196
East Java	Ngawi	VI (60-70 yrs)	5	07°20'38.3"S ~ 111°18'22.9"E	176
	Bojonegoro	IV (30-40 yrs)	5	07°19'22.1"S ~ 111°47'26.1"E	173

Note: FMUs = Forest Management Units; m ASL = meter above sea level

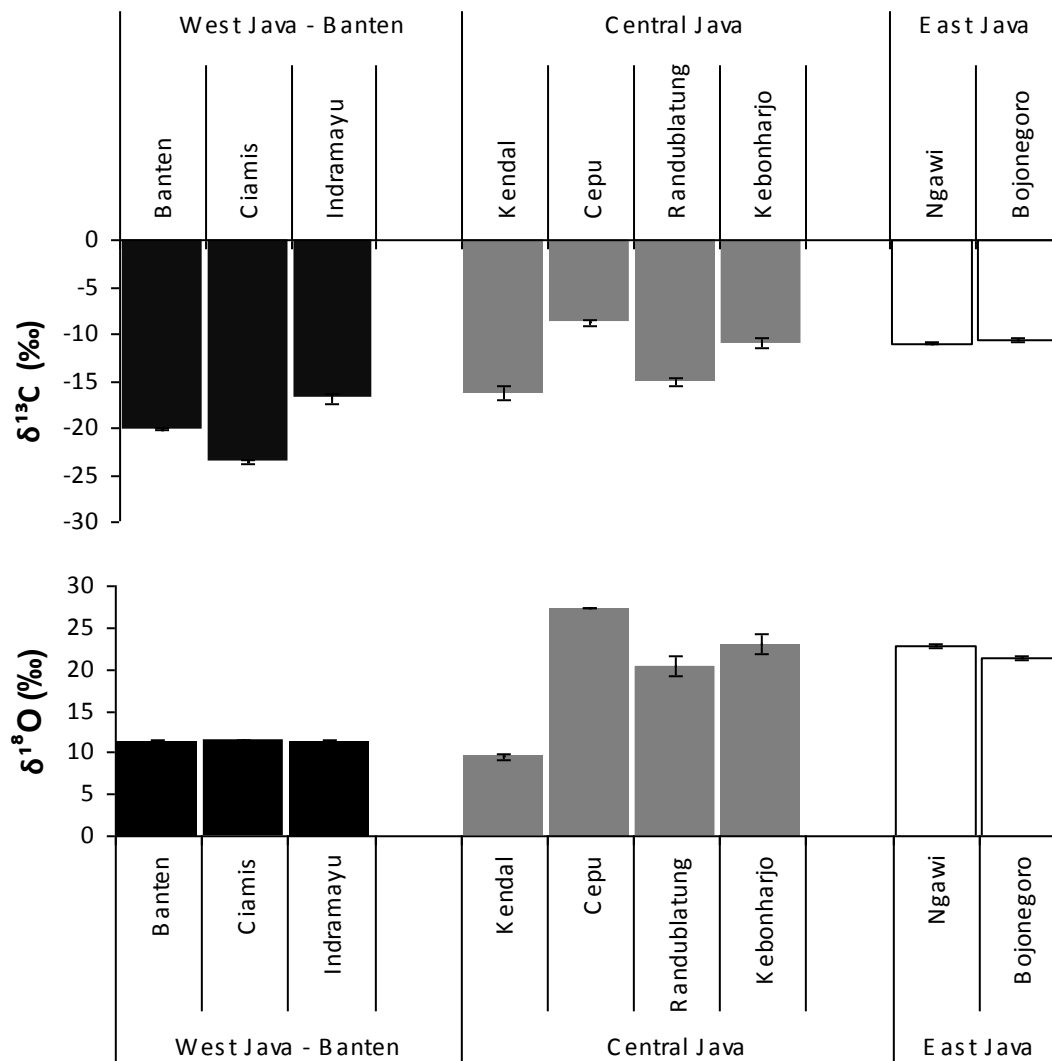


Figure 1. Isotopes composition $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Teak wood in Java.

Variasi nilai isotop disajikan pada Gambar 2 yang merupakan hasil kombinasi linier nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dari lokasi pengambilan contoh uji kayu. Hubungan yang disajikan diperoleh melalui analisis multivariat dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Hasil analisis menghasilkan dua komponen utama. Komponen utama pertama (PC1) memiliki *eigenvalue* 1.85 yang mewakili 92.70% dari seluruh variabilitas data. Pada komponen kedua (PC2) diperoleh *eigenvalue* sebesar 0.15 dengan keterwakilan 7.30% total variabilitas data.

Berdasarkan analisis PCA seperti disajikan pada Gambar 2 didapatkan dua pengelompokan komposisi isotop yang dimiliki masing-masing populasi Jati di Jawa. Kelompok pertama merupakan kayu Jati dari Jawa Barat-Banten dan Kendal (Jawa Tengah). Sedangkan Jati dari Jawa Tengah, minus Kendal dan Jawa Timur membentuk kelompok lain. Bila dikaitkan dengan data pada Gambar 3 menunjukan kayu Jati dari Jawa Tengah dan Jawa

Timur terlihat memiliki nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ yang lebih tinggi daripada Jawa Barat-Banten.

Penyebab variasi isotop kayu Jati di Jawa karena faktor geografis dapat dilihat dari perbedaan posisi garis bujur (*longitude*) dan topografinya (elevasi). Perbedaan kelas umur contoh uji kayu Jati tidak menunjukkan hubungan yang kuat ($R^2 = 0.16$ untuk $\delta^{13}\text{C}$; $R^2 = 0.10$ untuk $\delta^{18}\text{O}$) dengan kandungan isotop yang dihasilkan seperti terlihat pada Gambar 3.

Hubungan kandungan isotop kayu Jati dan posisi garis bujur populasi Jati tumbuh dapat dilihat pada Gambar 4. Persamaan garis regresi linier dari hubungan tersebut menunjukkan setiap kenaikan koordinat garis bujur 1° akan memperkaya kandungan isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ masing-masing sebanyak 2.42‰ dan 1.85‰. Di sini berarti bahwa populasi Jati yang tumbuh semakin ke arah timur Jawa akan menghasilkan kayu dengan kandungan isotop yang lebih diperkaya.

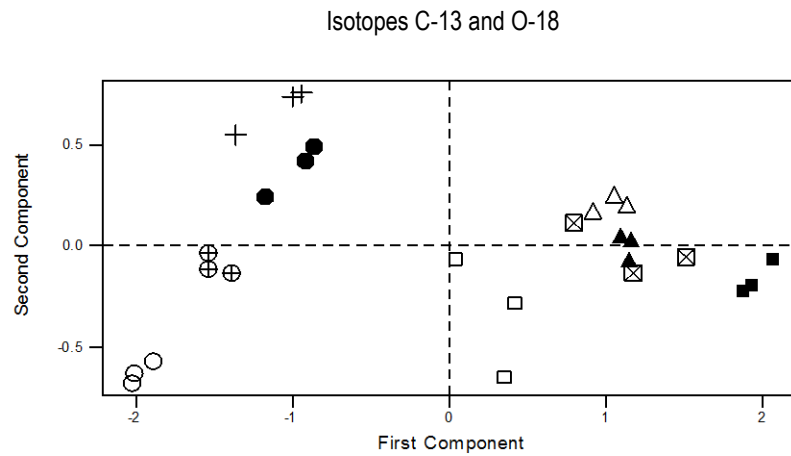


Figure 2. Result of PCA analysis of isotopes $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for Teak wood in Java. (■ Cepu; □ Randublatung; ▣ Kebonharjo; + Kendal; ● Indramayu; ○ Ciamis; ⊕ Banten; ▲ Ngawi; and △ Bojonegoro)

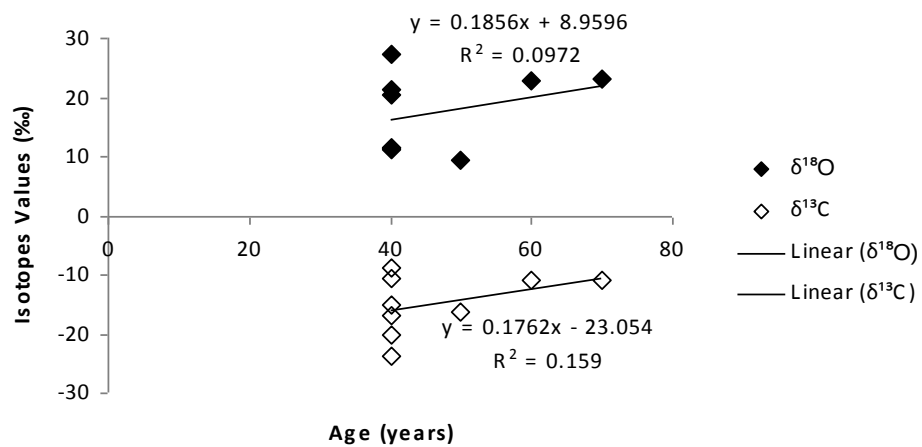


Figure 3. Relationship between isotopes content with age of Teak in Java.

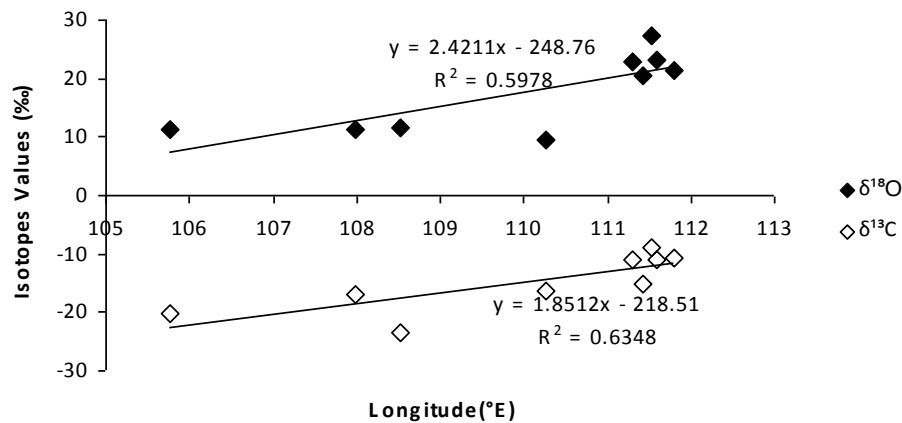


Figure 4. Relationship between isotopes content with longitude lines of location growth of Teak in Java.

Pengaruh elevasi tempat populasi Jati tumbuh terhadap kandungan isotop dalam kayu Jati ditunjukkan pada Gambar 5. Setiap kenaikan ketinggian tempat tumbuh 100 m akan memperkaya nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ sebesar 13‰ dan isotop $\delta^{18}\text{O}$ sebanyak 9.70‰. Populasi Jati di Jawa Barat-Banten tumbuh pada ketinggian dibawah 100 m dpl, sedangkan sebagian besar populasi Jati di Jawa Tengah dan Jawa Timur tumbuh pada ketinggian antara 100-200 m dpl.

Menurut Ehleringer dan Osmond (1991) sumber variasi isotop $\delta^{13}\text{C}$ pada tanaman yang tumbuh di darat secara prinsip berhubungan dengan difusi dari fraksinasi $\delta^{13}\text{C}$ selama proses biosintesis dan perbedaan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dalam CO_2 atmosfer yang diserap untuk fotosintesis. Kelimpahan relatif isotop CO_2 berbeda-beda pada setiap

tempat dan kondisi berbeda. Peningkatan CO_2 di atmosfer dapat diakibatkan dari aktivitas manusia dan respirasi tanaman. Terdapat dua isotop stabil karbon yaitu ^{12}C dan ^{13}C , keduanya memiliki perbedaan massa. CO_2 di atmosfer hampir seluruhnya merupakan ^{12}C sedangkan 1%-nya adalah ^{13}C . Respirasi tanaman, perusakan hutan dan polusi akibat pembakaran bahan organik akan melepaskan isotop berupa ^{12}C ke atmosfer yang menimbulkan fraksinasi CO_2 atmosfer yang terdiri dari $^{13}\text{CO}_2$ akan mengalami pemiskinan (*depleted*).

Pola umum curah hujan di Indonesia menunjukan pantai barat setiap pulau memperoleh jumlah hujan selalu lebih banyak dari pantai timur. Suryana (2001) menyebutkan daerah Jawa Barat memiliki curah hujan

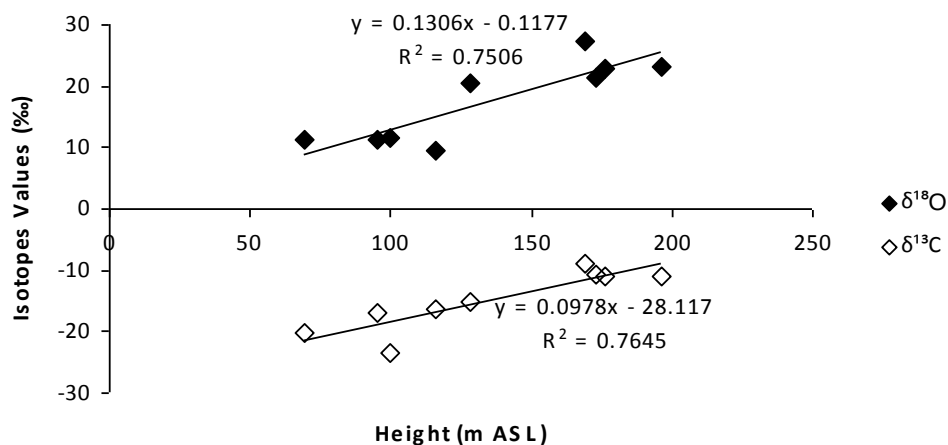


Figure 5. Relationship between isotopes content with growth height location of Teak wood in Java.

tinggi (> 1500 mm/th), sehingga tanaman Jati tidak menggugurkan daun. Di daerah Jawa Tengah dan Jawa Timur memiliki musim kemarau yang panjang dan tanaman Jati biasanya akan menggugurkan daunnya untuk efisiensi penggunaan air dan pengaturan kelembaban selama fotosintesis. Ehleringer dan Osmond (1991) menyebutkan efisiensi penggunaan air selama fotosintesis akan menghasilkan nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ yang tinggi. Kayu Jati dari Kendal relatif berbeda kandungan isotopnya dibanding populasi Jati Jawa Tengah lainnya diduga dipengaruhi keberadaan kawasan industri Kaliwungu. Nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ kayu Jati Jawa Barat yang lebih miskin dibanding Jawa Tengah disebabkan pula karena kondisi lingkungannya dekat daerah perkotaan dan kawasan industri. Aktivitas industri dan masyarakat perkotaan akan menghasilkan emisi CO_2 yang miskin $\delta^{13}\text{C}$ (Dawson dan Siegwolf 2007) yang selanjutnya diserap oleh tanaman untuk metabolisme sehingga kayu yang dibentuk memiliki isotop $\delta^{13}\text{C}$ yang rendah.

Sumber variasi nilai isotop $\delta^{18}\text{O}$ pada kayu Jati berhubungan dengan sumber air tanah yang digunakan selama pertumbuhan tanaman dan pembentukan kayu. Ketersediaan air tanah bagi tanaman mengikuti daur hidrologi. Menurut Djijono *et al.* (1989) daur hidrologi tidak merata akibat perbedaan presipitasi dari musim ke musim dan dari wilayah ke wilayah yang lain. Presipitasi merupakan uap yang terkondensasi dan jatuh ke daratan dalam rangkaian proses daur hidrologi. Faktor yang mempengaruhi ketidak-merataan presipitasi tersebut diantaranya ialah kondisi meteorologi (suhu udara, tekanan udara, dan arah angin) dan kondisi topografi. Hal tersebut mengakibatkan kandungan isotop *deuterium* dan $\delta^{18}\text{O}$ bervariasi pada perbedaan intensitas dan curah hujan serta musim dan lokasinya. Evans dan Schrag (2004) menyebutkan presipitasi dan suhu musiman mempengaruhi pembentukan kayu dan komposisi isotop $\delta^{18}\text{O}$ dalam kayu tergantung dari komposisi isotop dari sumber air dan pengayaan dalam daun karena evaporasi. Studi yang dilakukan Djijono *et al.* (1989) terhadap isotop $\delta^{18}\text{O}$ dalam air hujan menunjukkan setiap kenaikan curah hujan 100 mm akan menurunkan kandungan nilai isotop $\delta^{18}\text{O}$ sebanyak 1.5‰.

Kesimpulan

Terdapat kemiripan kandungan isotop karbon dan oksigen pada kayu Jati yang berasal dari Jawa Tengah dengan Jawa Timur, kecuali dari Kendal yang lebih mirip dengan Jawa Barat-Banten. Jati dari Jawa Tengah dan Jawa Timur memiliki isotop karbon dan oksigen yang lebih tinggi dibanding dari Jawa Barat-Banten. Populasi Jati yang tumbuh semakin ke arah timur Jawa akan menghasilkan kayu dengan kandungan isotop yang lebih diperkaya, setiap kenaikan koordinat garis bujur 1° akan

memperkaya kandungan isotop $\delta^{13}\text{C}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ masing-masing sebanyak 2.42‰ dan 1.85‰. Setiap kenaikan ketinggian tempat tumbuh 100 m akan memperkaya nilai isotop $\delta^{13}\text{C}$ sebesar 13‰ dan isotop $\delta^{18}\text{O}$ sebanyak 9.70‰.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Departemen Pendidikan Nasional (Depdiknas) yang telah membiayai penelitian ini. Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional dalam rangka penelitian hibah bersaing XIV pada tahun 2007 kepada Dr. Iskandar Z. Siregar (Ketua Peneliti) dengan Nomor Kontrak: 012/SP2H/PP/DP2M/III/2007.

Daftar Pustaka

- Augenstein W.; R.H. Liu. 2003. Forensic Applications of Isotope Mass Spectrometry. In: Yinon J (ed.). Advances in Forensic Application of Mass Spectrometry. CRC Press. Florida-USA: 149-180.
- Dawson T.E.; T.W. Siegwolf. 2007. Stable Isotopes as Indicator of Ecological Changes. Elsevier. USA.
- Djijono; Z. Abidin; Indrojono; S. Paston; Darman. 1989. Deuterium dan Oksigen-18 di dalam Air Hujan. Risalah Pertemuan Ilmiah Tahunan. Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi BATAN. Jakarta: 77-83.
- Djijono; B. Pratikno; Alip. 1996. Spektrometer Massa Rasio Isotop. Prosiding Pertemuan Ilmiah Jabatan Fungsional Pranata Nuklir dan Pengawas Radiasi IV. Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi BATAN. Jakarta: 116-129.
- Ehleringer J.; C.B. Osmond. 1991. Stable Isotopes. In: Percy R.W.; J. Ehleringer; H.A. Mooney; P.W. Rundel. Plant Physiological Ecology: Field Method and Instrumentation. Chapman and Hall. London: 281-300.
- Ehleringer J.; C. Cook; M. Lott. 2007. Stable Isotope Methods. SIRFER. University of Utah. Salt Lake City.
- Evans M.N.; D.P. Schrag. 2004. A Stable Isotope-based Approach to Tropical Dendro-climatology. Geo. et Cos. Acta. 68 (16): 3295-3305.
- Hobson K.A. 2007. An Isotopic Exploration of the Potential of Avian Tissues to Track Changes in Terrestrial and Marine Ecosystems. In: Dawson T.E.; T.W. Siegwolf (ed.). Stable Isotopes as Indicator of Ecological Changes. Elsevier. USA: 129-144.
- Loader N.J.; I. Robertson; D. McCarroll. 2003. Comparison of Stable Carbon Isotope Ratios in the Whole Wood, Cellulose and Lignin of Oak Tree-

- rings. J. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 196: 395-407.
- Trueman C.N.; A. Moore. 2007. Use of the Stable Isotope Composition of Fish Scale for Monitoring Aquatic Ecosystems. In: Dawson T.E.; T.W. Siegwolf (ed.). *Stable Isotopes as Indicator of Ecological Changes*. Elsevier. USA: 145-162.
- Smith B.N.; S. Epstein. 1971. Two Categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratios for Higher Plants. *Plant Physiol. J.* 47: 380-384.
- Suryana Y. 2001. *Budidaya Jati*. Swadaya. Bogor.

Makalah masuk (*received*) : 27 September 2008
 Diterima (*accepted*) : 16 April 2009
 Revisi terakhir (*final revision*) : 20 April 2009

Agus Kholik
 Balai Besar Penelitian Dipterokarpa
 (*Dipterocarps Research Center*)
 Jl. AW. Syahrani, Sempaja, Samarinda, Kalimantan Timur
 Tel./Fax. : 62-541-206-364
 E-mail : kholik@dephut.go.id

Djiono
 Lab. Pengujian Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi
 (*Center for Application of Isotope and Radiation Technology*)
 Badan Tenaga Nuklir Nasional (*National Nuclear Energy Agency*)
 Jl. Cinere Pasar Jumat Kotak Pos 7002 JKT 12070
 Tel. : 62-21-769-0709
 Fax. : 62-21-769-1607
 Email : patir@batan.go.id

Iskandar Z. Siregar, Lina Karlinasari, Ulfah J. Siregar, dan Tedi Yunanto
 Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor
 (*Faculty of Forestry, Bogor Agricultural University*)
 Jl. Kampus IPB Darmaga, Bogor, 16680, Indonesia
 Tel./Fax : 62-251-8621-677
 E-mail : siregar@ipb.ac.id
 l_karlinasari@yahoo.com
 ulfahjsiregar@yahoo.com
 genom_tedi@yahoo.com