

Peranan Isotop ^{13}C pada Lingkar Pohon dalam Pencatatan Perubahan Siklus Karbon di Atmosfer

The role of the ^{13}C isotope of the Tree Ring in Recording of Carbon Cycle Change in Atmosphere

E. Ristin Pujiindiyati

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN)

Email: ristinpi@batan.go.id

ABSTRACT

Some natural materials such as tree rings, rocks, sediments, ice cores, coral reefs, shell fish and micro fossil record the chemical, physical and biological changes in atmosphere that had taken place in the past. One of these changes which are recorded in tree rings is C-13 isotope. Through the measurement of ratio of ^{13}C compared to ^{12}C (defined as $\delta^{13}\text{C}$ value), it can be known atmospheric CO_2 conditions in the past to reflect the present conditions. Present value of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 is -7.5‰ that had decreased gradually from -6.69 in 1956. Pre-industrial $\delta^{13}\text{C}$ value in atmospheric CO_2 is not available. However, the historical records of those are stored in tree rings. Starting from pre-industrial era about 1850 up to 2000, the records of $\delta^{13}\text{C}$ value in some tree rings which are spread in northern hemisphere showed decreasing value ranging from 0.6‰ to 2.3‰ . Major factors contributing to variability of these $\delta^{13}\text{C}$ values are pollution effects and climatic effects. Besides those, some effects such as choice of the wood components, inner ring variability and juvenile stage of trees are also correlated to variability of $\delta^{13}\text{C}$ value. Records of $\delta^{13}\text{C}$ value from tree rings defined that atmospheric CO_2 from pre-industrial era were between 240 ppm and 310 ppm then this concentration continuously increase to 340 ppm at present. Integrated biospheric carbon flux calculated for $\delta^{13}\text{C}$ records in tree rings using four models from the year of 1850 to 1975 showed an increasing value between 135 Gt and 345 Gt.

Keywords: Tree rings, C-13 isotope, atmospheric CO_2

PENDAHULUAN

Perubahan data kimia, fisik dan biologi pada atmosfer waktu lampau tersimpan di dalam batuan, sedimen, lapisan es, lingkaran pohon, batu karang, kerang dan fosil mikro. Catatan ini dapat digunakan untuk menentukan kondisi masa lalu iklim bumi di berbagai daerah dan sistem atmosfernya. Ilmu yang mempelajari tentang perubahan iklim yang diambil pada skala dari seluruh sejarah bumi adalah paleoklimatologi. Paleoklimatologi memiliki implikasi yang luas terhadap perubahan iklim sekarang. Para ilmuwan sering mengkaji perubahan lingkungan di masa lalu dan keanekaragaman hayatinya untuk merefleksikan situasi di masa kini dan secara khusus dampak iklim terhadap kepunahan masal dan pemulihan biotanya.

Salah satu pencatat kondisi masa lampau adalah lingkaran pohon. Lingkaran pohon ini dibentuk oleh perubahan tingkat pertumbuhan sebuah pohon sepanjang tahun. Lapisan tipis

jaringan hidup tepat di bawah kulit (*kambium*) meletakkan sel-sel baru di atas yang lebih tua. Ketika kambium mengembang keluar, sel tertua mati meninggalkan *lignin-keras cellulose exoskeletons* dibelakang. Perubahan ukuran sel menghasilkan pola pita karakteristik terlihat pada potongan kayu seperti terlihat pada Gambar 1. Pohon-pohon di daerah beriklim sedang memproduksi lingkaran pohon yang paling jelas karena perbedaan besar dalam tingkat pertumbuhan antara awal dan akhir musim. Sebaliknya, pohon-pohon tropis umumnya tumbuh pada iklim yang lebih konstan sepanjang tahun sehingga lingkaran pohon terlihat kurang jelas.

Pada awalnya adalah orang Yunani kuno yang menyadari hubungan antara lingkaran pohon dengan umur pohon tersebut. Sampai suatu saat di tahun 1901 seorang astronom di Observatorium Lowell Arizona memberikan suatu kejutan dengan memunculkan gagasan bahwa variasi iklim mempengaruhi ukuran lingkaran (cincin) sebuah pohon. Ide ini

mengubah cara pandang ilmuwan dalam mempelajari iklim, dan lingkaran pohon menyediakan data berkesinambungan yang

merupakan bagian penting dari model iklim modern. Astronom tersebut adalah A.E. Douglass yang kemudian diberi penghormatan



Gambar 1. Pertumbuhan lingkaran pohon yang mencatat perubahan iklim di masa lalu

sebagai bapak *dendrochronology* (bidang ilmu yang mempelajari umur kayu). A.E. Douglass merupakan orang pertama yang menerapkan pendekatan ilmiah secara maksimal untuk mempelajari lingkaran pohon, yakni dengan menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengkaitkan variasi lebar lingkaran pohon sebagai indikasi catatan iklim. Seiring dengan kemajuan teknologi sehingga ditemukan alat untuk mengukur kandungan isotop dalam materi alam yakni spektrometer massa pada tahun 1952, parameter isotop C-13 dalam lingkaran pohon mulai dikembangkan untuk mempelajari kondisi atmosfer waktu lampau.

TEORI

Peranan Isotop Alam C-13

Pada saat ini penelitian klimatologi lebih menitikberatkan pada konsentrasi CO_2 di atmosfer karena variabel ini sangat penting dalam pemodelan perubahan iklim. Padahal, sejarah CO_2 di atmosfer tidak hanya diuraikan dengan perubahan konsentrasi CO_2 saja tetapi juga dibarengi dengan perubahan komposisi isotopnya. Dua isotop stabil yang berperan pada siklus karbon di alam adalah ^{12}C dan ^{13}C .

Kedua isotop ini berbeda dalam massa-nya sehingga menimbulkan perbedaan sifat fisika-kimia dalam suatu molekul. Perbandingan kandungan isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dinyatakan sebagai $\delta^{13}\text{C}$ yang nilainya relatif terhadap senyawa standar PDB (*Peedee Belemnite*) dalam satuan permill (‰). Nilai $\delta^{13}\text{C}$ digunakan sebagai parameter adanya perubahan kandungan isotop karbon karena perubahan lingkungan yang mempengaruhi molekul karbon.

Sejarah perbandingan isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ pada karbon atmosfer berhubungan dengan perubahan ukuran kecepatan pertukaran isotop antara berbagai reservoir karbon. Sebagai contoh reservoir karbon adalah samudera ($\delta^{13}\text{C}$ sekitar 0‰), CO_2 tanah ($\delta^{13}\text{C}$ antara -30 ‰ dan -10‰), CO_2 kulit bumi ($\delta^{13}\text{C}$ antara -10 ‰ dan -2‰), minyak bumi dan batubara ($\delta^{13}\text{C}$ antara -33 ‰ dan -22‰). Perbandingan isotop stabil $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dalam CO_2 menurun sebagai akibat aktifitas antropogenik. Penurunan $\delta^{13}\text{C}$ merupakan ukuran yang baik terhadap aktifitas antropogenik total karena tidak hanya merefleksikan pembakaran bahan bakar fosil tetapi juga CO_2 yang dilepaskan akibat deforestasi dan manipulasi pertanian.

Nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer saat ini adalah -7,5 ‰. Pengukuran yang dilakukan oleh Keeling et.al. (1980) dan Mook et.al. (1981) memperlihatkan bahwa nilai tersebut menurun dari -6,69 ‰ pada tahun 1956 hingga -7,34 ‰ pada tahun 1978 dan sampai -7,46 ‰ pada tahun 1980. Data $\delta^{13}\text{C}$ sebelum era industri tidak tersedia karena ilmu pengetahuan dan teknologinya belum berkembang sepesat sekarang. Akan tetapi, karena karbon dalam kayu terasimilasi dari CO_2 atmosfer maka pencatatan secara historis $\delta^{13}\text{C}$ tersimpan pada pertumbuhan lingkaran pohon (*tree ring*).

Pengukuran yang dilakukan melalui $\delta^{13}\text{C}$ pada fraksi selulosa kayu modern tidak diragukan lagi telah mengalami penurunan secara signifikan. Akan tetapi, suatu ketidakpastian tetap ada pada interpretasi data penurunan $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon. Hal ini disebabkan oleh informasi $\delta^{13}\text{C}$ atmosfer

bergantung pada kondisi lingkungan lokal dan faktor klimatologi.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Sinyal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ pada Kayu Modern

Seperti telah dikemukakan bahwa kenaikan konsentrasi CO_2 atmosfer akan mempengaruhi penurunan $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon. Pencatatan $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon semakin rumit yang disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah reaksi pertukaran. Atom karbon dari bahan bakar fosil, dari hutan dan sumber tanah akan bertukar dengan atom karbon dari lautan dan dari reservoir biosfer. Pengaruh pengenceran $\delta^{13}\text{C}$ yang disebabkan oleh pertukaran ini harus diperhitungkan jika catatan $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon akan dikonversikan ke catatan sejarah CO_2 atmosfer. Sebagai tambahan terhadap perubahan $\delta^{13}\text{C}$ atmosfer, variasi $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon juga disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah:

a. Pemilihan komponen kayu

Bentuk senyawa kimia karbon dalam kayu yang dianalisa memegang peranan penting. Komponen yang membentuk kayu seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin akan berbeda kandungan isotopnya. Pada umumnya pencatatan $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon dilakukan dengan menggunakan selulosa karena mudah untuk diekstrak menjadi komponen murni sehingga mengurangi kesalahan dalam eksperimental. Selain itu, setelah selulosa ditetapkan pada tempatnya (menjadi lingkaran pohon) senyawa ini tidak diangkat lagi seperti senyawa lain sehingga memungkinkan para ahli untuk tegas menentukan waktu informasi isotop. Preparasi selulosa juga harus dikerjakan dengan memperhatikan bahwa tidak ada tambahan fraksinasi isotop secara buatan sehingga dapat mengintegrasikan variasi isotop dari seluruh fase tumbuh sepanjang tahun.

b. Variabilitas lingkaran dalam

Keliling lingkaran kayu yang lebih muda menunjukkan data isotop karbon lebih seragam, sedangkan kayu yang lebih tua memperlihatkan variasi antara 0,1 sampai dengan 1% dan terkadang hingga 4 atau 5%. Perbedaan isotop karbon pada keliling lingkaran kayu mungkin berkaitan dengan pertumbuhan pohon. Hal ini menunjukkan kondisi lingkungan yang berbeda di sekitar pohon. Perubahan kandungan isotop karbon

terhadap ketinggian terutama pada serat kayu yang sama dapat diabaikan. Untuk menghindari variasi isotop karbon yang berkenaan dengan lingkaran dalam, Tans dan Mook (1980) menganalisa bahan kayu dari seluruh keliling lingkaran.

c. Tingkatan umur

Dalam beberapa studi menunjukkan kecenderungan peningkatan $\delta^{13}\text{C}$ pada pohon yang lebih muda sebagai akibat pengambilan secara parsial CO_2 tanah yang mempunyai nilai $\delta^{13}\text{C}$ lebih rendah. Efek ini berhenti setelah pohon berusia lebih dari 50 tahun dan menghilang setelah pohon mencapai ketinggian tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa catatan $\delta^{13}\text{C}$ pada pohon yang lebih tua akan lebih mewakili sinyal $\delta^{13}\text{C}$ atmosfer bebas. Akan tetapi catatan $\delta^{13}\text{C}$ tiap-tiap pohon tidak dapat mewakili variasi $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer pada skala global. Sebagai contoh, $\delta^{13}\text{C}$ pohon oak di hutan pegunungan Spessart Jerman Selatan menunjukkan lonjakan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dan variasi yang tidak sistematis yang tidak sesuai dengan urutan waktu. Efek kanopi dari pohon di hutan dan fluktuasi CO_2 tanah diperkirakan sebagai penyebab utamanya. Sehingga disimpulkan bahwa catatan $\delta^{13}\text{C}$ pohon di hutan tidak berguna baik untuk perubahan $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer bebas ataupun untuk variasi iklim. Untuk analisa $\delta^{13}\text{C}$ pohon yang tepat, lebih baik dipilih pohon yang berdiri bebas dan jauh dari lokasi urban.

d. Efek polusi

Beberapa studi tentang $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon memperlihatkan bahwa udara yang terpolusi berat, misalnya terpolusi oleh gas SO_2 , akan menurunkan fraksinasi isotop karbon pada proses fotosintesisnya. Udara yang terpolusi akan menghambat fotosintesis tanaman dan menyebabkan peningkatan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dalam meteri tanaman. Efek ini diteliti oleh Levitt dan Long (1983) pada pohon dari Arizona. Pohon – pohon yang diambil dari lokasi terbuka di daerah pedalaman memperlihatkan kecenderungan penurunan $\delta^{13}\text{C}$ selama 20 tahun terakhir, sedangkan pohon yang diambil di lokasi sekitar peleburan tembaga memperlihatkan kecenderungan kenaikan nilai $\delta^{13}\text{C}$.

Kenaikan ini disebabkan oleh proses pengapuran yang melepaskan CO_2 berat (^{13}C lebih banyak daripada ^{12}C sehingga nilai $\delta^{13}\text{C}$ mendekati 0‰). Dari data nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon selama abad ke 19 menunjukkan kecenderungan sama menurun sedangkan catatan $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon di abad ke 20 menunjukkan variasi yang lebih besar. Hal ini mungkin merefleksikan peningkatan ruang polusi udara atau peningkatan keasaman hujan selama abad ini.

e. *Efek iklim*

Efek iklim dapat mengganggu sinyal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosfer terhadap catatan nilai $\delta^{13}\text{C}$ lingkaran pohon terutama pada periode tahun 1920 sampai dengan tahun 1960. Pada periode ini variasi iklim lebih banyak terjadi. Korelasi yang signifikan antara perubahan data iklim terhadap perbedaan kandungan isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ pada pohon di Swedia Utara telah diteliti oleh Freyer dan Belacy (1983). Dari penelitian tersebut diketahui bahwa perubahan suhu rata-rata pada musim gugur berpengaruh terhadap $\delta^{13}\text{C}$ pohon sebesar $+0,18\text{‰}$ dan pada musim semi perubahan curah hujan berpengaruh terhadap $\delta^{13}\text{C}$ pohon sebesar $+0,019\text{‰}$. Akan tetapi penelitian yang dilakukan oleh Leavitt dan Long pada pohon di Arizona memberikan respon $\delta^{13}\text{C}$ yang negatif sebesar $-0,27\text{‰}$ terhadap perubahan suhu ($1\text{ }^\circ\text{C}$) dan sebesar $-0,04\text{‰}$ untuk setiap perubahan (millimeter) curah hujan selama bulan Desember. Perbedaan ini berkaitan dengan suhu optimum untuk proses fotosintesis tanaman, pada iklim yang lebih dingin di Swedia Utara terjadi kenaikan $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sedangkan daerah yang beriklim hangat seperti di Arizona berpengaruh sebaliknya.

HASIL

Kecenderungan Nilai $\delta^{13}\text{C}$ Lingkaran Pohon di Hemisfer Utara

Seperti telah diungkapkan di atas bahwa nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang tercatat pada lingkaran pohon telah mengalami penurunan sebagai akibat kegiatan antropogenik yang dimulai dari adanya revolusi industri. Kecenderungan penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dan deviasi data 10 tahunan dari beberapa lingkaran pohon di hemisfer utara seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Apabila

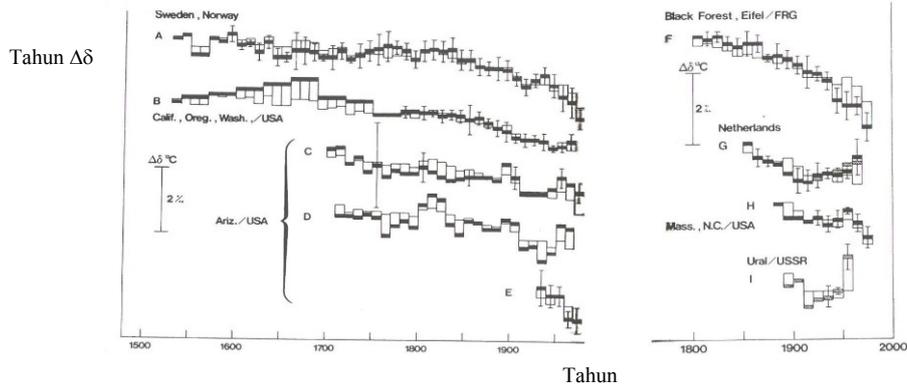
data nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada Gambar 2 tersebut dirata-ratakan maka tampak secara jelas penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ sejak tahun 1950 hingga sekarang seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Catatan A memperlihatkan nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang diperoleh dari 6 pohon *Pinus silvestris* dari utara Swedia. Catatan ini dimulai pada tahun 1530 yakni pada periode pre-industri. Selama lebih dari 300 tahun, rata-rata nilai $\delta^{13}\text{C}$ tidak memperlihatkan kecenderungan. Mendekati tahun 1700 tampaknya nilai $\delta^{13}\text{C}$ sedikit berfluktuasi kemudian menurun tajam selama tahun 1920 hingga 1940. Jika diamati maka mulai tahun 1850 hingga sekarang, data $\delta^{13}\text{C}$ menurun hingga $1,75\text{‰}$.

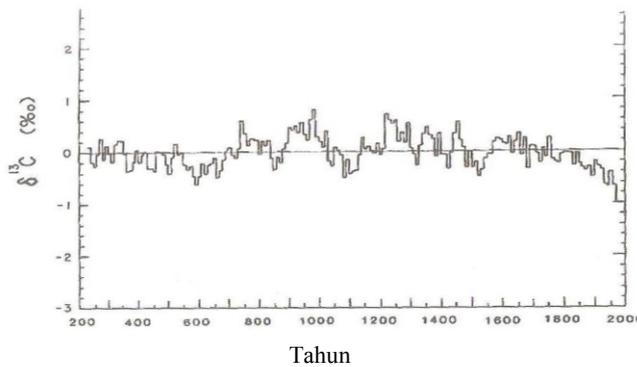
Catatan B merupakan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada 2 pohon *Pinus langaeva* dan 2 pohon *Pseudotsuga menziesii* dari Oregon dan Washington. Nilai $\delta^{13}\text{C}$ selama periode pre-industri selama tahun 1530 hingga 1749 memperlihatkan kenaikan selama setengah periode yang pertama dan kemudian menurun selama setengah periode berikutnya. Total variasi nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada periode tersebut adalah $\pm 0,5\text{‰}$. Selama periode tahun 1750 hingga 1850 nilai $\delta^{13}\text{C}$ konstan. Tahun 1950, data nilai $\delta^{13}\text{C}$ memperlihatkan penurunan dengan total perubahan sekitar $0,85\text{‰}$ sesuai dengan rata-rata penurunan yang diperoleh di hemisfer utara. Data nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada catatan B berakhir pada tahun 1970 yang menunjukkan sedikit kenaikan selama 20 tahun terakhir.

Catatan C merupakan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada pohon *Pinyon pines* dari Arizona meliputi tahun 1700 hingga saat ini. Dimulai dari tahun 1700 hingga 1940, nilai $\delta^{13}\text{C}$ menurun sebesar $1,4\text{‰}$ dan meningkat dari tahun 1940 hingga 1960 kemudian mengalami penurunan kembali. Total penurunan dari abad ke 19 hingga saat ini adalah $0,6\text{‰}$.

Catatan D adalah nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang diukur dari *Pinus ponderosa* dari Arizona yang meliputi waktu sama dengan catatan C. Tanpa melihat data tahun 1800 hingga 1850, catatan D mirip dengan catatan C. Total penurunan dari tahun 1710 hingga 1940 adalah $1,3\text{‰}$. Setelah tahun 1940, nilai $\delta^{13}\text{C}$ meningkat yang berarti tidak ada perubahan selama era industri.



Gambar 2. Kecenderungan $\Delta\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon yang diplotkan terhadap interval waktu



Gambar 3. Rata-rata perubahan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon di hemisfer utara

Catatan E adalah rata-rata nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada 6 pohon *Pinus juniper* dari Arizona. Catatan ini mencakup periode dari 1930 hingga sekarang. Selama tahun 1960 hingga 1979 nilai $\delta^{13}\text{C}$ cenderung mendatar. Nilai yang konstan ini adalah tidak sesuai dengan yang diharapkan untuk perubahan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer. Akan tetapi setelah dilakukan perhitungan dengan kwadrat terkecil, tampak penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ sesuai dengan penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ dalam CO_2 atmosfer, nilai $\delta^{13}\text{C}$ ini berdeviasi 1,0 ‰.

Catatan F adalah nilai $\delta^{13}\text{C}$ dari pohon *Pinus silvestris* di hutan di Black Forest dan Eifel. Catatan ini dimulai dengan nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang konstan dari tahun 1800 hingga 1870, kemudian menurun 2,3 ‰ hingga saat ini. Penurunan ini melampaui rata-rata kecenderungan untuk hemisfer utara yakni sebesar 1,0 ‰ untuk periode yang sama.

Catatan G adalah nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang diukur pada 3 pohon oak (*Quercus robur*) di hutan

perbatasan Netherlands. Catatan G memperlihatkan penurunan sekitar 1‰ dari tahun 1850 hingga 1920, diikuti dengan kenaikan sekitar 0,6‰ setelah tahun 1970.

Catatan H adalah nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang diukur pada 4 pohon oak, 2 pohon pinus dan 1 pohon poplar (*Populus alba*) dari Massachusetts. Catatan ini menyimpulkan terjadi penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ sekitar 0,9 ‰ dari tahun 1880 hingga sekarang. Data ini lebih kecil 0,1‰ dari rata-rata kecenderungan nilai $\delta^{13}\text{C}$ di hemisfer utara.

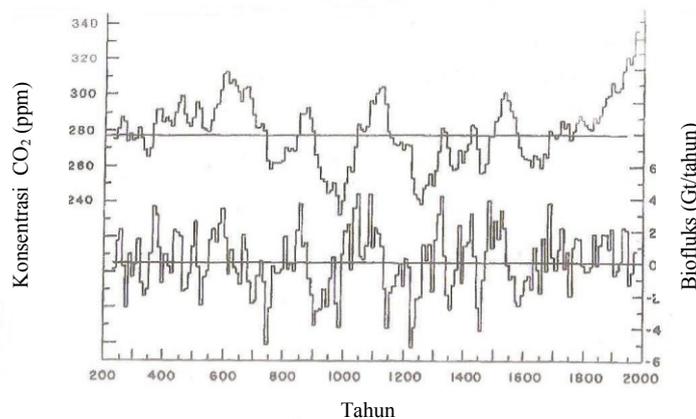
Catatan I adalah nilai $\delta^{13}\text{C}$ yang diukur pada pohon cemara dari pegunungan Ural di Rusia. Data ini memperlihatkan penurunan 0,3‰ dari tahun 1890 hingga 1950 kemudian meningkat 1,0 ‰ pada periode 1940 hingga 1949 dan 1950 hingga 1959.

Sejarah Pelepasan Gas CO_2 ke Atmosfer

Setelah data penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon di hemisfer utara dirata-ratakan, kemudian direkonstruksikan bagaimana sejarah

pelepasan gas CO_2 ke atmosfer pada masa lampau hingga sekarang. Gambar 4 memperlihatkan grafik fluks biosferik dan banyaknya pelepasan CO_2 ke atmosfer yang dihitung dari catatan $\delta^{13}\text{C}$ pada Gambar 2. Keeling et al (1980) membuat suatu model perhitungan konsentrasi CO_2 di atmosfer dalam urutan waktu dan juga memasukkan parameter penambahan CO_2 dari bahan bakar fosil. Dalam perhitungan konsentrasi CO_2 di atmosfer dalam urutan waktu, konsentrasi CO_2 awal diatur sehingga nilai yang dihitung pada tahun 1965 sesuai dengan nilai yang terukur

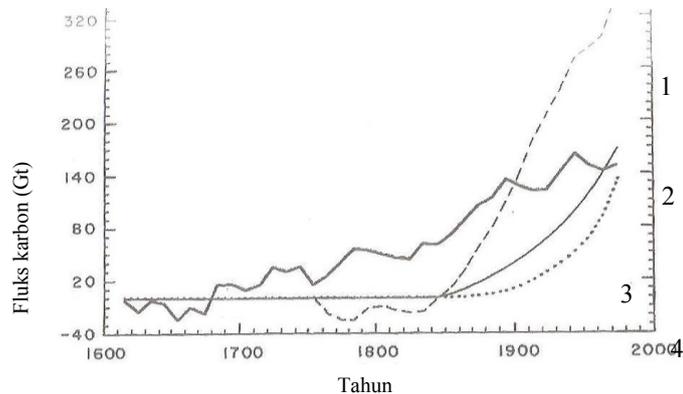
yakni 320 ppm. Pada Gambar ini terlihat bahwa konsentrasi CO_2 di atmosfer sebelum era industri, dari tahun 235 sampai dengan tahun 1850, bervariasi antara 240 dan 310 ppm dengan rata-rata 276 ppm. Nilai ini bersesuaian dengan penentuan konsentrasi CO_2 di atmosfer sebelum era industri yang dihitung dari $\delta^{13}\text{C}$ pada lapisan es di antartika. Setelah terjadinya era industri yakni setelah tahun 1850 hingga tahun 2000, konsentrasi CO_2 di atmosfer mengalami peningkatan yang cukup signifikan, yakni mencapai 340 ppm.



Gambar 4. Fluks karbon biosferik dan konsentrasi CO_2 di atmosfer yang dihitung dari catatan $\delta^{13}\text{C}$ pada Gambar 2

Jumlah karbon yang terlepas dari biosferik secara keseluruhan yang dihitung dari berbagai model diplotkan pada Gambar 5. Berdasarkan catatan $\delta^{13}\text{C}$ seperti yang tertera pada Gambar 3, diestimasikan bahwa antara tahun 1600 hingga 1975 banyaknya karbon biosferik yang terlepas adalah sekitar 150 Gt (grafik 2). Nilai ini hampir sama dengan jumlah kumulatif karbon yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar fosil saja pada tahun 1975 yakni sekitar 135 Gt (grafik 4). Sementara itu, Houghton et.al (1983) mengestimasikan bahwa sejak tahun 1860 hingga 1975 biosferik melepaskan karbon sebanyak 126 hingga 213 Gt dengan nilai rata-rata 170 Gt (grafik 3). Perhitungan menurut Freyer dan Belacy (1983) dari nilai

$\delta^{13}\text{C}$, menghasilkan total fluks biosferik lebih besar hingga 345 Gt untuk periode antara 1860 dan 1975 (grafik 1). Data ini kemudian dikoreksi sendiri oleh Freyer dengan menambahkan data $\delta^{13}\text{C}$ dari 9 pohon *Arizona Pinyon* pinus sehingga diperoleh total fluks biosferik lebih rendah dari 345 Gt. Keempat model perhitungan yang tertera pada Gambar 5 memberikan suatu kesimpulan yang sama bahwa terjadi peningkatan pelepasan karbon biosferik ke atmosfer sejak era industri yakni tahun 1850 hingga tahun 1975.



Gambar 5. Total fluks karbon biosferik yang dihitung dari berbagai model

KESIMPULAN

Dalam studi paleoklimatologi, salah satu parameter yang dapat dipergunakan adalah isotop C-13. Isotop C-13 yang terkandung dalam lingkaran pohon mencatat perubahan-perubahan kondisi di atmosfer pada waktu lampau sehingga situasi saat ini dapat direfleksikan. Sebelum tahun 1956 alat pengukur isotop C-13 belum ditemukan sehingga nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer sebelum tahun 1956 tidak dapat terukur akan tetapi catatan itu tersimpan dalam lingkaran pohon. Pada saat ini nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada CO_2 atmosfer terus mengalami penurunan dari $-6,69\text{‰}$ pada tahun 1956 hingga $-7,5\text{‰}$. Catatan nilai $\delta^{13}\text{C}$ pada beberapa lingkaran pohon di hemisfer utara dari era industri tahun 1850 hingga tahun 2000 memperlihatkan penurunan yang bervariasi dari $0,6\text{‰}$ hingga $2,3\text{‰}$. Dari data $\delta^{13}\text{C}$ pada beberapa lingkaran pohon tersebut diestimasi bahwa konsentrasi CO_2 di atmosfer sebelum era industri adalah 240 ppm hingga 310 ppm kemudian meningkat hingga 340 ppm saat ini. Jumlah fluks karbon biosfer yang dihitung dari catatan $\delta^{13}\text{C}$ pada beberapa lingkaran pohon dengan empat model, juga mengalami peningkatan dari tahun 1850 hingga 1975 yakni antara 135 Gt dan 345 Gt. Faktor utama yang mempengaruhi penurunan $\delta^{13}\text{C}$ pada lingkaran pohon adalah iklim dan polusi, semakin terpolusi CO_2 atmosfer semakin besar penurunan nilai $\delta^{13}\text{C}$.

DAFTAR PUSTAKA

Andreu, L., Planells, O., Gutierrez, E., Helle, G., 2008, *Climatic significance of tree ring width*

and $\delta^{13}\text{C}$ in a Spanish pine forest network., *Tellus*, 60B, 771-781

Clark, I.D., Fritz, P., 1997, *Environmental isotopes in hydrogeology : groundwater quality*, Boca Raton – New York Lewis publishers

Freyer, H.D and Belacy, N., 1983., *$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ records in northern hemisphere trees during the past 500 years, anthropogenic impact and climatic superpositions*, *J. Geophys. Res.* 88

Houghton, R.A., Hobbie, J.E., Melilo, J., 1983, *Changes in the Carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: net release of CO_2 to the atmosphere*, *Ecol. Monogr.* 53 (3)

Keeling, C.D., Bacastow, R.B., and Tans, P.P., 1980, *Predicted shift in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide*, *Geophys. Res. Lett.* 7

Minze Stuiver , 1980, *Ancient Carbon Cycle Changes Derived from Tree Ring ^{13}C and ^{14}C* , *Science*, 207

<http://www.warnaindonesia.com>, Sang dewa cincin: memahami ilmu lingkaran cincin pohon, posted 4 April 2011

