

Studi Komposisi Rasio Isotop ^{13}C Air Hujan di Wilayah Lebak Bulus, Jakarta Selatan

Study of ^{13}C Ratio Isotope Composition of Lebak Bulus Rainwater, South Jakarta

Bungkus Pratikno dan Nurfadhlini

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49 Jakarta 12440
Email : bungkus@batan.go.id

ABSTRAK

Telah dilakukan pengukuran komposisi isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$) dari contoh air hujan wilayah Lebak Bulus, Jakarta Selatan. Studi ini bertujuan untuk mengetahui dampak emisi gas buang antropogenik terhadap kualitas udara di atmosfer Jakarta. Pengamatan dilakukan berdasarkan sampel air hujan yang jatuh khususnya di wilayah PAIR-BATAN, Lebak Bulus, Jakarta Selatan pada September 2009 sampai dengan Juni 2010. Penelitian menggunakan metode pengukuran komposisi rasio isotop ^{13}C dari karbon inorganik terlarut (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) dalam air hujan. Pengukuran komposisi rasio isotop ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) menggunakan spektrometer massa rasio isotop SIRA-9 VG ISOGAS. Dari hasil sepuluh bulan pengukuran $\delta^{13}\text{C}$ air hujan didapat $\delta^{13}\text{C}$ bulan Februari 2010 sebesar $-10,71\text{‰}$ dan merupakan nilai yang paling rendah (*depleted*) dibanding dengan pengukuran sembilan bulan lainnya, sedangkan hasil pengukuran yang tinggi (*enrich*) didapat pada bulan Desember 2009 sebesar $-8,52\text{‰}$. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi rasio isotop $\delta^{13}\text{C}$ dari gas CO_2 atmosfer Lebak Bulus, Jakarta Selatan lebih *depleted* dibandingkan dengan atmosfer daerah udara bersih yang hanya sebesar $-8,1\text{‰}$. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa ada penambahan gas buang CO_2 hasil kegiatan antropogenik.

Kata kunci : delta, isotop ^{13}C , emisi, iklim, hujan asam

ABSTRACT

^{13}C isotope composition of Lebak Bulus, South Jakarta rainwater samples have been analyzed and interpreted. The aim of study is to know about the impact of emission gas from anthropogenic activities on ^{13}C isotope composition of Lebak Bulus, South Jakarta rainwater. Rainwater samples were collected and monitored from PAIR - BATAN, Lebak Bulus- South Jakarta on September 2009 until June 2010. The Method is referred to DIC (Dissolved Inorganic Carbon) of atmospheric Carbon dioxide absorbed by rainwater. The ^{13}C isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) was measured using mass spectrometer SIRA-9 VG-ISOGAS. After ten months of measurement it showed that $\delta^{13}\text{C}$ value in February 2010 was $-10,71\text{‰}$, the most depleted value compared with another nine months, while the high measurement results (*enrich*) obtained in December 2009 amounted to $-8,52\text{‰}$. The results showed that atmospheric CO_2 gas levels in Lebak Bulus, South Jakarta were more depleted compared to the composition of the isotope ratio of $\delta^{13}\text{C}$ atmospheric clean air area of only $-8,2\text{‰}$. The decline in the value of Lebak Bulus atmospheric isotope ratio composition, South Jakarta becomes more negative than the clean air atmosphere, indicating that there is addition of CO_2 emissions from anthropogenic activity.

Keywords : delta, isotope ^{13}C , emission, climate, acid rain

PENDAHULUAN

Teknologi pengukuran rasio isotop stabil dewasa ini berkembang sangat pesat. Teknologi isotop stabil adalah salah satu teknologi yang sangat berguna dalam penelitian yang berkaitan dengan perubahan iklim serta respon dari

lingkungan terhadap perubahan tersebut. Hal ini dimungkinkan karena isotop stabil terdapat dalam berbagai matriks alam seperti dalam sedimen di danau dan lautan, sebagai komponen dari molekul air, baik dalam bentuk es yang terdapat di kutub bumi, glasier dan lapisan es di daerah dingin dan di puncak pegunungan, juga sebagai presipitasi

dan bahkan terdapat pula dalam tumbuhan, biota laut dan udara bebas pada lapisan atmosfer bumi [1,2].

Atmosfir adalah lapisan diatas permukaan bumi yang berhubungan langsung dengan aktivitas kehidupan manusia. Peningkatan kandungan gas-gas dalam atmosfer menjadi perhatian para ahli iklim dunia, khususnya gas rumah kaca, karena anomali peningkatannya telah diindikasikan sebagai penyebab terjadinya pemanasan global.

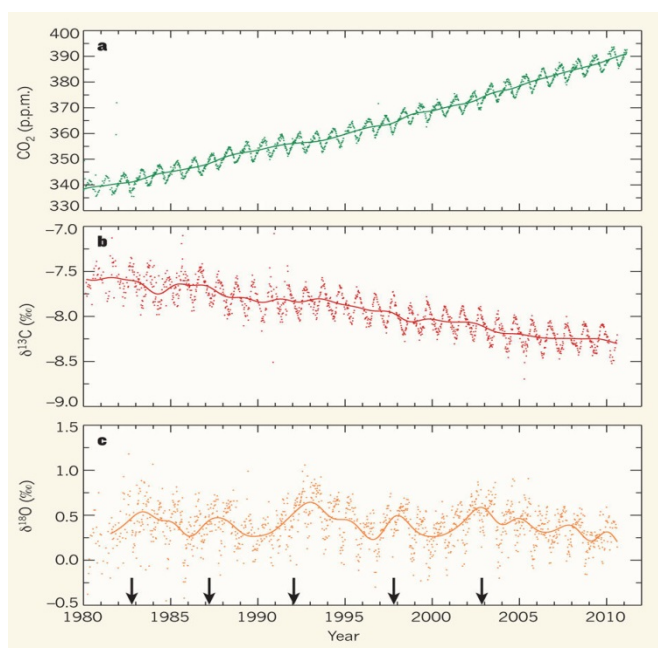
Kepadatan penduduk, lalu lintas dan aktifitas perekonomian dan industri yang tinggi sangat mempengaruhi kualitas udara di atmosfer, kondisi ini terjadi di hampir seluruh kota-kota besar di dunia, diantaranya adalah di Jakarta. Sumber-sumber pencemaran udara terutama berasal dari penggunaan energi fosil (bahan bakar), proses industri, kegiatan pertanian, perubahan lahan dan hutan, dan dari proses pengolahan limbah (termasuk sampah). Sumber cemaran udara ini dapat menyebabkan deposisi asam air hujan yang diindikasikan oleh nilai derajat keasaman atau pH air hujan. Nilai pH air hujan yang lebih kecil dari 5,6 merupakan indikasi terjadinya hujan asam di suatu wilayah [4]. Selain itu tingginya penggunaan bahan bakar fosil dalam kegiatan industri, transportasi dan lainnya

berdampak pula pada meningkatnya emisi gas rumah kaca di atmosfer seperti CO_2 , CH_4 , dan N_2O .

Para ilmuwan sepakat bahwa, peningkatan suhu bumi karena terjadinya peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer khususnya gas CO_2 [5].

Konsentrasi CO_2 meningkat 25 % persen setelah revolusi industri. Pusat pemantauan cuaca Amerika di Mauna Loa, Hawaii, menginformasikan adanya kenaikan CO_2 sebesar 18 % dari tahun 1958 hingga tahun 2002 dan berdampak pada peningkatan suhu bumi dari 0,5 hingga 2 °C. Emisi CO_2 ini cenderung meningkat terutama dalam periode 2004 – 2007 [6].

Molekul gas CO_2 tersusun atas komposisi isotop $^{12}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$ dan $^{14}\text{CO}_2$, dimana isotop ^{12}C dan ^{13}C merupakan isotop stabil, sedangkan isotop ^{14}C merupakan isotop tidak stabil atau radioisotop yang memancarkan sinar β . Isotop-isotop karbon ini di atmosfer berhubungan langsung dengan siklus karbon dari gas CO_2 hasil dari berbagai proses dalam ekosistem bumi (*terrestrial ecosystem*). Rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dari gas CO_2 yang terkandung dalam udara di atmosfer telah banyak dimanfaatkan dalam penelitian yang berhubungan dengan perubahan iklim global [7,8].



Gambar 1. Konsentrasi CO_2 dan kandungan isotop stabil ^{13}C atmosfer tahun 1970-2005 yang diukur di stasiun pengamatan Mauna Loa-Hawai [13].

Hasil penelitian para ahli iklim dunia yang dilakukan di stasiun pengamatan di pegunungan Mauna Loa – Hawaii, daerah yang menjadi representasi atmosfer yang relatif bersih, menunjukkan nilai komposisi rasio isotop ^{13}C atmosfer yang terus mengalami penurunan menjadi lebih negatif (*depleted*) dari $-7,6\text{‰}$ pada tahun 1970 menjadi $-8,2\text{‰}$ pada tahun 2010, seperti terlihat pada Gambar 1. Hasil pengukuran ini menjadi acuan besarnya kandungan isotop ^{13}C dalam CO_2 atmosfer bumi untuk daerah dengan lingkungan yang relatif bersih [13]. Gas CO_2 di atmosfer sebagian akan terabsorpsi oleh uap air dan akan jatuh ke bumi sebagai hujan. Menurut WILLEY et.al. fluk karbon global di atmosfer yang terserap air hujan global sekitar 0,3 Giga ton per tahun atau 6 % dari total 5,5 Gt per tahun fluk karbon gas buang bahan bakar fosil yang menginjeksi atmosfer global.

Secara teoritis setiap satu liter air hujan memiliki kandungan karbondioksida sebesar 0,55 - 0,60 mg yang berasal dari karbon dioksida yang terdapat di atmosfer, karena berasal dari atmosfer, maka CO_2 yang terabsorpsi oleh air hujan ini akan mempunyai nilai komposisi rasio isotop ^{13}C relatif sama dengan atmosfernya [11].

Komposisi rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dalam gas CO_2 udara di atmosfer yang mengalami tambahan emisi bahan bakar fosil atau gas buang, akan mengalami perubahan menjadi lebih rendah (*depleted*) dibandingkan dengan komposisi rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ gas CO_2 atmosfer di daerah bersih. Menurut FRIEDMAN and O'NIEL (1977) besarnya fraksinasi isotop pada reaksi kesetimbangan antara $\text{CO}_{2(\text{g})}$ dan $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ sekitar -1‰ , sehingga nilai $\delta^{13}\text{C}$ dari CO_2 terlarut dalam kesetimbangan CO_2 atmosfer menjadi lebih rendah sekitar -1‰ . Berdasarkan latar belakang tersebut penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya komposisi rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ yang terkandung dalam air hujan yang turun di wilayah Jakarta [12].

Komposisi rasio isotop didefinisikan sebagai nilai perbandingan konsentrasi suatu isotop yang bermassa lebih berat terhadap isotop ringannya. Komposisi rasio isotop dilambangkan sebagai δ dengan satuan permill atau ‰ , dan dinyatakan dengan rumus berikut :

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sampel}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standar}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standar}}} \times 1000 \quad (\text{‰})$$

Dalam pengukuran rasio isotop $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ digunakan standar acuan PDB (*Pee Dee Belemnite*) yaitu standar yang berasal dari formasi batuan di daerah South Carolina - Amerika Serikat yang mempunyai nilai $\delta^{13}\text{C}$ sebesar $2,45\text{‰}$. Standar PDB merupakan standar acuan internasional yang telah direkomendasikan oleh Badan Tenaga Atom Internasional IAEA (*International Atomic Energy Agency*) dalam pengukuran komposisi rasio isotop ^{13}C yang terkandung dalam berbagai jenis matrik alam.

Penelitian komposisi rasio isotop stabil dalam air hujan ini, menggunakan pendekatan hasil pengukuran sampel air hujan di atas wilayah Jakarta, khususnya yang ditampung di Laboratorium Hidrologi dan Panasbumi, PAIR-BATAN, Jakarta, kemudian sampel dianalisis kandungan isotop ^{13}C -nya dengan menggunakan spektrometer massa SIRA-9, dan hasil pengukurannya diharapkan dapat menjelaskan dinamika kandungan isotop ^{13}C dalam air hujan untuk wilayah Jakarta yang berhubungan dengan kualitas udara di atmosfer Jakarta.

BAHAN DAN METODE

Penelitian komposisi rasio isotop stabil air hujan ini dilakukan dengan metode isotop stabil ^{13}C dalam air hujan, khususnya air hujan yang dipantau dan ditampung di stasiun curah hujan kawasan Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN di Jalan Lebak Bulus Raya, Jakarta Selatan.

Pengambilan sampel air hujan

Air hujan bulanan yang mengguyur kota Jakarta, khususnya di daerah Lebak Bulus Jakarta Selatan, ditampung setiap bulannya dengan alat penampung curah hujan yang didesain khusus seperti terlihat dalam Gambar 2. Pada setiap akhir bulan, air hujan yang terkumpul di ukur volumenya dan sebanyak 1 liter digunakan untuk pengukuran rasio isotop ^{13}C .

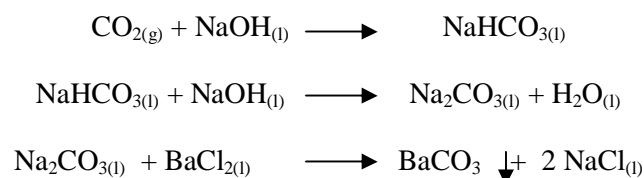
Analisis isotop ^{13}C air hujan

Metode analisis isotop ^{13}C dilakukan dengan mengambil 1 liter air hujan yang terkumpul tiap bulannya untuk ditambahkan larutan NaOH 0,2 N bebas CO_2 , kemudian diaduk hingga homogen lalu ditambahkan BaCl_2 10 %, hasil reaksi tersebut selanjutnya dibiarkan hingga

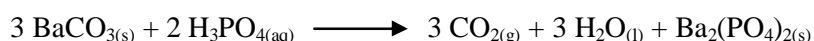


Gambar 2. Alat penampung curah hujan bulanan (yang dilengkapi *paraffin oil* untuk mencegah terjadinya evaporasi)

terbentuk endapan karbonat. Endapan yang didapat disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 50-60 °C. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Endapan BaCO_3 yang sudah dikeringkan kemudian direaksikan dengan H_3PO_4 100 % dalam tabung pada kondisi vakum. Gas CO_2 yang terlepas dalam tabung reaksi tersebut kemudian ditangkap dengan menggunakan N_2 cair dengan suhu -195°C pada kondisi tabung yang sudah divakumkan. Lanjutan dari persamaan di atas adalah sebagai berikut :



kemudian gas CO_2 yang didapat dianalisis komposisi rasio isotop ^{13}C -nya dengan spektrometer massa rasio isotop SIRA-9 VG-ISOGAS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengamatan dan hasil pengukuran isotop stabil air hujan Jakarta bulan

Desember 2009 sampai dengan Juni 2010 tampak pada Tabel 1 dan 2.

Berdasarkan data hasil pengukuran insitu intensitas curah hujan dan derajat keasaman (pH) air hujan bulanan disajikan pada Tabel 1, tampak bahwa intensitas curah hujan bervariasi, dan derajat keasaman yang diukur menggunakan pH meter menunjukkan nilai yang fluktuatif serta

tidak mengikuti pola intensitasnya seperti tampak pada Gambar 3, sehingga dapat dikatakan, bahwa derajat keasaman air hujan bulanan Jakarta tidak berkorelasi secara signifikan dengan intensitasnya,

Tabel 1. Data pengukuran insitu intensitas dan pH air hujan Jakarta

No.	Bulan Pengamatan	Vol CH (ml)	Intensitas CH (mm)	pH
1	September 2009	2640	50.87	5,43
2	Oktober 2009	1780	34.30	5,47
3	Nopember 2009	1120	21.58	5,41
4	Desember 2009	2800	53,95	5,24
5	Januari 2010	5900	113,68	5,31
6	Pebruari 2010	6900	132,95	5,13
7	Maret 2010	5800	111,75	5,17
8	April 2010	3480	67,05	5,16
9	Mei 2010	7500	144,51	5,14
10	Juni 2010	4500	86,71	5,21

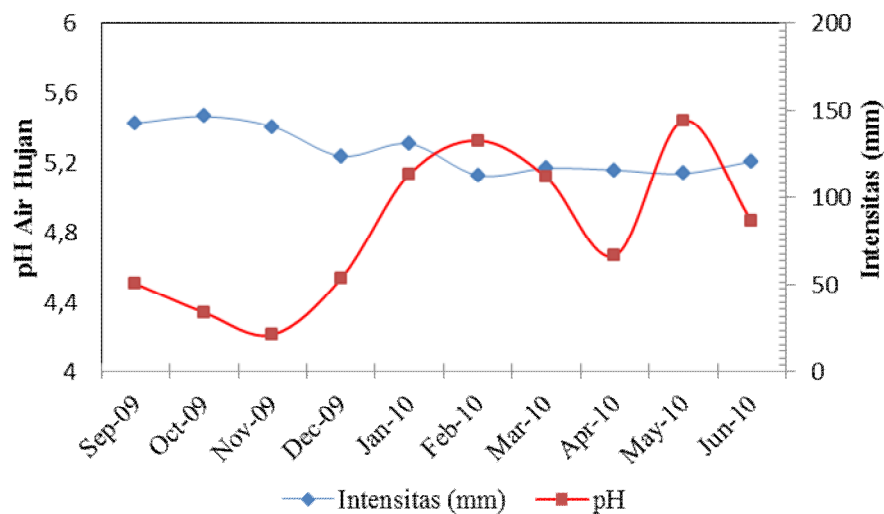
CH = Curah Hujan

Tabel 2. Hasil pengukuran rasio isotop stabil air hujan Jakarta

No.	Bulan Pengamatan	$\delta^{13}\text{C}$ ($^0/_{00}$) _{PDB}
1	September 2009	-9,41
2	Oktober 2009	-9,27
3	Nopember 2009	-8,89
4	Desember 2009	-8,52
5	Januari 2010	-9,38
6	Pebruari 2010	-10,71
7	Maret 2010	-9,32
8	April 2010	-9,43
9	Mei 2010	-10,15
10	Juni 2010	-9,73

artinya bahwa derajat keasaman air hujan tidak tergantung pada kuantitas curah hujannya tetapi tergantung pada kualitas gas-gas atmosfer yang diserapnya.

Dari sepuluh bulan pengamatan terhadap curah hujan, intensitas tertinggi terjadi pada bulan Mei 2010 dan intensitas terendah pada bulan Nopember 2009 masing-masing sebesar 144,51



Gambar 3. Grafik Intensitas curah hujan dan pH air hujan bulan Desember 2009 – Juni 2010

mm dan 21,58 mm, sedangkan pengukuran derajat keasaman dengan *pH* meter, menunjukkan *pH* rata-rata sebesar 5,27. Hasil ini mengindikasikan bahwa hujan yang turun sudah merupakan hujan asam, karena derajat keasamannya lebih rendah dari batas derajat keasaman normal air hujan *pH* sebesar 5,6.

Indikasi terjadinya hujan asam ini juga sudah dilaporkan oleh BMKG pada tahun 2008 berdasarkan data pengamatan derajat keasaman air hujan di 12 stasiun pengamatan di seluruh Indonesia dari tahun 2005 hingga 2008 dengan data seperti pada Tabel 3. Pada Tabel 3 tampak bahwa air hujan Jakarta memiliki derajat keasaman rata-rata sejak tahun 2005 hingga 2008 sebesar 4,51 nilai ini jauh di bawah ambang batas normal yang ditentukan yaitu 5,6.

fosil kegiatan industri dan transportasi yang tinggi seperti yang terjadi sehari-hari di Jakarta. Tingginya emisi gas buang kendaraan bermotor ini terjadi disebabkan oleh adanya peningkatan jumlah penggunaan kendaraan mobil dan motor di wilayah Jakarta.

Berdasarkan data Dinas Komunikasi Informatika dan Statistik, PEMDA DKI Jakarta seperti pada tabel-4, terlihat adanya peningkatan jumlah kendaraan mobil rata-rata setiap hari dari tahun 2008 hingga tahun 2010 sebanyak 261,3 mobil/hari sedangkan motor mengalami penambahan sebanyak 1147 motor/hari. Meningkatnya pertumbuhan penggunaan kendaraan bermotor ini jelas sangat mempengaruhi kualitas udara atmosfer Jakarta, sehingga emisi gas buang kendaraan bermotor

Tabel 3. Data *pH* Air Hujan 12 Kota/Kabupaten di Indonesia [14]

No.	Provinsi	Kabupaten/Kota	2005	2006	2007	2008
1	Sumatera Barat	Kab. Agam	4,79	4,67	5,33	5,41
2	Sumatera Selatan	Palembang	5,02	4,73	5,59	5,82
3	Bengkulu	Bengkulu	5,25	5,01	5,93	5,78
4	DKI Jakarta	Jakarta	4,30	4,51	4,64	4,59
5	Jawa Barat	Bandung	4,62	4,47	4,74	5,06
6	Bali	Denpasar	5,06	5,01	5,76	5,27
7	Nusa Tenggara Barat	Mataram	5,00	4,74	5,27	5,56
8	Kalimantan Barat	Pontianak	5,04	5,20	5,19	5,09
9	Kalimantan Selatan	Banjar Baru	5,16	4,76	5,13	5,25
10	Sulawesi Utara	Manado	5,12	4,69	5,26	5,27
11	Sulawesi Selatan	Maros	5,09	4,96	5,89	5,79
12	Irian Jaya	Jayapura	4,71	4,75	5,33	5,27

Sumber : BMKG tahun 2008

Data pengukuran komposisi rasio isotop ^{13}C disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa nilai komposisi rasio isotop ^{13}C air hujan berada pada kisaran $-10,71\text{‰}$ hingga $-8,52\text{‰}$, nilai ini mengindikasikan bahwa kandungan isotop ^{13}C air hujan Jakarta berasal dari CO_2 atmosfer yang terabsorpsi oleh air hujan. Pengukuran selama sepuluh bulan pengamatan terhadap kandungan isotop ^{13}C air hujan yang turun di wilayah Lebak Bulus, Jakarta Selatan, menunjukkan nilai lebih rendah dibandingkan kandungan isotop ^{13}C atmosfer udara bersih $-8,2\text{‰}$. Hal ini terjadi karena gas CO_2 atmosfer yang terabsorpsi air hujan, dan turun di wilayah Lebak Bulus, Jakarta Selatan sudah mengalami pencampuran dengan gas CO_2 dari hasil kegiatan antropogenik, terutama dari emisi bahan bakar

menjadi faktor utama menurunnya komposisi rasio isotop ^{13}C atmosfer Jakarta khususnya dari peningkatan emisi gas CO_2 .

Dari data hasil pengukuran komposisi rasio isotop ($\delta^{13}\text{C}$) air hujan Jakarta seperti pada Tabel 2 dapat dilihat pula, nilai pengukuran kandungan isotop ^{13}C terendah terjadi bulan Pebruari 2010. Jika dibandingkan dengan kandungan isotop ^{13}C yang seharusnya $-8,1\text{‰}$ (sesuai dengan kandungan isotop ^{13}C atmosfer udara), maka hasil pengukuran bulan Pebruari 2010 sebesar $-10,71\text{‰}$ menjadi lebih rendah (*depleted*) sebesar $-2,61\text{‰}$. Selisih penurunan ini mengindikasikan bahwa, emisi gas CO_2 dari hasil kegiatan antropogenik yang didominasi pemakaian bahan bakar fosil baik dari kegiatan industri maupun transportasi, tertinggi terjadi pada bulan Pebruari

Tabel 4. Data Pertambahan Kendaraan Bermotor di DKI Jakarta Tahun 2008 s.d. 2014 [15]

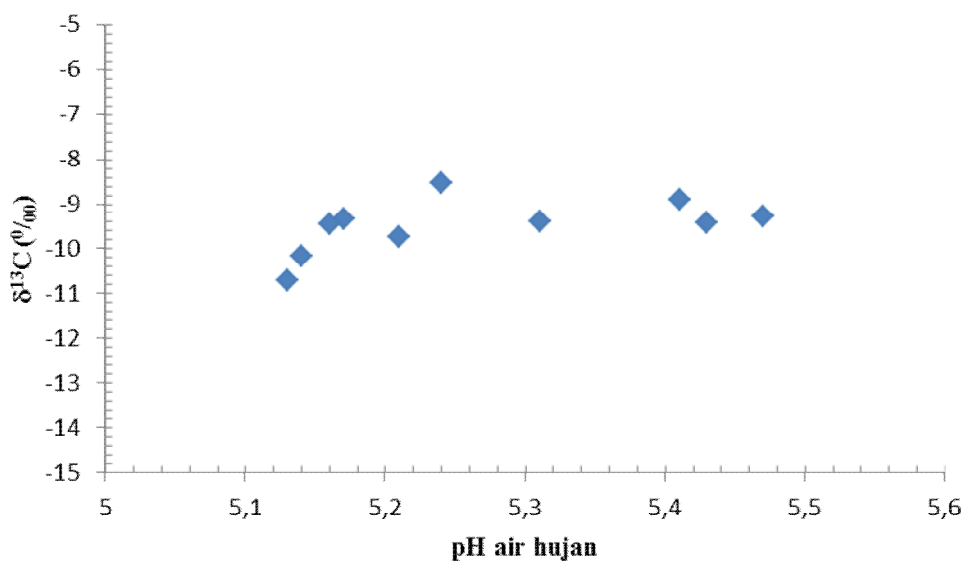
Tahun	Jumlah		Pertambahan			
	Mobil	Motor	Mobil		Motor	
			Pertahun	Per hari	Pertahun	Per hari
2008	2295644	3968749	77264	211	389127	1066
2009	2355354	4333559	59710	163	364810	999
2010	2505133	4835650	149779	410	502091	1376
2011	2665988	5313995	160855	440	478345	1310
2012	2801918	5650925	135930	372	336930	923
2013	3046434	6211367	244516	669	560442	1535
2014	3215542	6687375	169108	463	476008	1304

Sumber : Data Dinas Komunikasi Informatika dan Statistik, PEMDA DKI Jakarta, 2017

2010, karena menyebabkan kandungan isotop ^{13}C mengalami penurunan sebesar $-2,61 \text{ ‰}$, sedangkan emisi terendah terjadi pada bulan Desember 2009 karena hanya menyebabkan penurunan kandungan rasio isotop ^{13}C air hujan sebesar $-0,42 \text{ ‰}$. Selisih penurunan ini mengindikasikan bahwa, emisi gas CO_2 dari hasil kegiatan antropogenik yang didominasi pemakaian bahan bakar fosil baik dari kegiatan industri maupun transportasi, tertinggi terjadi pada bulan Pebruari 2010, karena menyebabkan kandungan isotop ^{13}C mengalami penurunan sebesar $-2,61 \text{ ‰}$, sedangkan emisi terendah terjadi pada bulan Desember 2009 karena hanya menyebabkan penurunan kandungan isotop ^{13}C air hujan sebesar $-0,42 \text{ ‰}$. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa dari sepuluh bulan pengamatan

air hujan, maka udara atau atmosfer wilayah Lebak Bulus, Jakarta Selatan relatif bersih terjadi pada bulan Desember 2009, sedangkan mengalami pencemaran relatif tinggi terjadi pada bulan Pebruari 2010 dengan derajat keasaman (pH) sebesar 5,13 dan dengan intensitas air hujan sebesar 132,95 mm.

Hubungan derajat keasaman air hujan dengan komposisi isotop $\delta^{13}\text{C}$ seperti terlihat pada gambar-4, menunjukkan bahwa semakin rendah derajat keasaman air hujan akan semakin menurun komposisi isotop ^{13}C -nya. Hal ini disebabkan karena makin tinggi kandungan asam karbonat hasil reaksi kesetimbangan gas CO_2 yang terlarut dalam air hujan, akan menyebabkan semakin rendah derajat keasamannya dan indikasi ini menunjukkan pula, semakin besar jumlah gas CO_2



Gambar 4. Grafik Hubungan pH terhadap $\delta^{13}\text{C}$ Air hujan bulan September 2009 s/d Juni 2010

yang berhasil diserap (terabsorpsi) oleh air hujan akan meningkatkan kualitas pencampuran gas CO₂ atmosfer dalam air hujan tersebut. Tingkat keasaman air hujan juga sangat dipengaruhi oleh adanya emisi gas buang SO_x dan NO_x sebagai limbah buangan dari asap kendaraan bermotor dan industri. Secara khusus tidak dibahas dalam makalah ini seberapa besarnya pengaruh SO_x dan NO_x dalam meningkatkan derajat keasaman air hujan, karena penelitian dilakukan hanya pada kandungan rasio isotop ¹³C dalam gas CO₂ atmosfer yang terabsorpsi oleh air hujan.

KESIMPULAN

Dari data hasil pengukuran in situ maupun pengukuran laboratorium terhadap komposisi isotop ¹³C air hujan beserta pembahasannya, ditarik beberapa kesimpulan :

1. Derajat keasaman (pH) air hujan wilayah Jakarta rata-rata 5,27 yang merupakan indikasi hujan asam;
2. Besarnya komposisi rasio isotop $\delta^{13}\text{C}$ air hujan dapat digunakan sebagai indikator adanya peningkatan gas rumah kaca, khususnya CO₂ di atmosfer;
3. Dari sepuluh bulan pengamatan :
 - a. Injeksi gas rumah kaca CO₂ di atmosfer Jakarta tertinggi pada bulan Pebruari 2010 dan menyebabkan penurunan komposisi rasio isotop $\Delta (\delta^{13}\text{C}) = -2,61 \text{ ‰}$.
 - b. Injeksi gas rumah kaca CO₂ di atmosfer Jakarta terendah pada bulan Desember 2009, dan menyebabkan penurunan komposisi rasio isotop ¹³C sebesar $\Delta (\delta^{13}\text{C}) = -0,42 \text{ ‰}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah ikut berpartisipasi dalam penelitian ini, khususnya kepada bapak Kepala PAIR dan temana-teman di Kelompok Hidrologi dan Panas bumi PAIR-BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. IPCC Fourth Assessment Report, Climate Change, Contents 2, "Chemically and Radiatively important gases - Atmospheric Carbon Dioxide". Climate Change 2007, Working Group I, The Physical Basis, 2007.
2. I.C. Prantise, G.D. Farquhar, M.J.R. Fasham, M.L. Goulden, M. Heimann, V.J. Jaramillo, H.S. Khesghi, C. Le Quéré, R.J. Scholes, D.W.R. Wallace et.al. "The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide". Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), PUBLISHED BY THE PRESS SYNDICATE OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom, IPCC-2002.
3. Melanie J. Leng, Isotopes in Palaeoenvironmental Research, NERC Isotope Geosciences Laboratory, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham-UK and School of Geography, University of Nottingham, Nottingham – UK. Volume 10. Publish by Springer, 2006.
4. Maulyani DJ., Hardini, A. Wijono, P.Harimurti, Lindawati, Luhut P., L. Gaol, Abdul Azis S., Indira S. dan Adi F. Ramli, "Status Lingkungan Hidup Indonesia 2008". Kementrian Negara Lingkungan Hidup RI, 2009.
5. Prosenjit Ghosh, Willi A. Brand, Stable isotope ratio mass spectrometry in global climate change research, *Isotopen-und Gaslabor, Max-Planck-Institut für Geochemie, Postfach 100164, Jena 07701, Germany* Received 29 January 2003, accepted 20 May 2003, *International J. of Mass Spectrometry, Elsevier*, vol. 228, pp. 1–33, 2003.

6. G.B. Avery JR, J.D. Willey, R.J. Kieber, Carbon isotopic characterization of dissolved organic carbon in rainwater: Terrestrial and marine influences, Department of Chemistry and Biochemistry, University of North Carolina Wilmington, Wilmington, NC 28403-5932, USA, 2006.
7. Górka M, Sauer PE, Lewicka-Szczebak D, Jędrysek MO. "Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 .", *Environ Pollut.* 2011 Jan;159(1):294-301. doi: 10.1016/j.envpol.2010.08.027.
8. Zimnoch M, Florkowski T, Necki J, Neubert R., Diurnal variability of delta ^{13}C and delta ^{18}O of atmospheric CO_2 in the urban atmosphere of Kraków, Poland., *Isotopes Environ Health Stud. Jun*; vol. 40, no. 2, pp. 129-43, 2004.
9. Toni Samiaji, Trismidianto, Eddy Hermawan, Martono dan Mugni Hadi, Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca Pada Sektor Industri dari Pemakaian Energi, Prosiding Seminar on Application and Research in Industrial Technology, 2008 Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT UGM, Yogyakarta, 27 Agustus, 2008.
10. Chunaeni Latief, Perbedaan Sebaran Karbon Pada Atmosfer Permukaan dan Menengah Bulan Desember 2007 Hasil Pengukuran Profil Vertikal CO_2 Di Watu Kosek, Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2008 (SNATI 2008), Yogyakarta, 21 Juni, 2008.
11. P.S. Datta, S.K. Tyagi, Climatic Significance of Stable Isotope Characteristics of Air- CO_2 and Rainfall in Delhi Area Water-Plant-Air System, Nuclear Research Laboratory, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India, Proceedings, Study of Environmental Change using Isotope Techniques, IAEA, Vienna, 2002.
12. Irving FRIEDMAN and James R. O'NEIL, "Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest", Data of Geochemistry, Geological Survey Professional Paper 440-KK, Sixth Edition, United States Government Printing Office, Washington, 1977.
13. Matthiaz Cuntz, "Carbon Cycle : A dent in carbon's gold standard, *Nature*, vol. 477, pp. 547-548, 2011.
14. Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, "Data pH Air Hujan 12 Kota/ Kabupaten di Indonesia tahun 2008".
15. Portal Data Terpadu Pemerintah Provinsi DKI Jakarta, Publikasi oleh : Dinas Komunikasi, Informatika, Dan Statistika Provinsi DKI JAKARTA, Th. 2017, <http://data.jakarta.go.id/dataset/data-pertambahan-jumlah-kendaraan-bermotor-dki-jakarta>.

