

# STUDI AIR TANAH PADA AREA SEMBURAN LUMPUR LAPINDO SIDOARJO MENGGUNAKAN ISOTOP ALAM

## GROUNDWATER STUDY AT LAPINDO SIDOARJO MUDFLOW AREA USING NATURAL ISOTOPES

Satrio\* dan Bungkus Pratikno  
Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi-BATAN  
\*e-mail: trio\_crb@yahoo.com

### Abstract

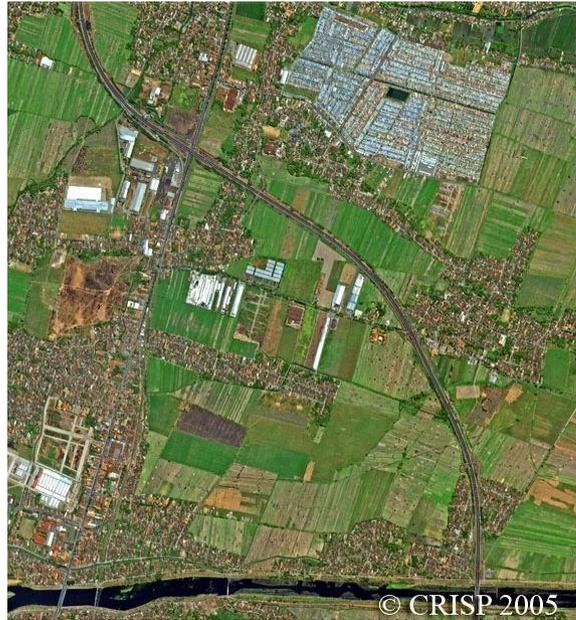
Groundwater age study has been carried out on mud eruption area in Sidoarjo using natural isotopes. The study was done in 2007 and 2009 by analyzing water samples from mud eruption area. The aim of the study was to identify water characteristics which seeped out from the mud eruption area. Origins of the water can be fossil water, groundwater, or sea water. The  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ , and  $\delta^2\text{H}$  data, which were plotted together with  $\delta^{18}\text{O}$  data of the water samples of 2007 (LUSI-1 and LUSI-2), showed that water from the center of mud eruption area had interacted with magmatic materials. Whereas, the water from LUSI-3 location which was collected about 300 m distance from the center of mud eruption area had an age of more than 40,000 years, which contained  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , and  $^2\text{H}$  of  $1.58\text{‰}$ ,  $5.28\text{‰}$ , and  $-17.5\text{‰}$  respectively. This matter indicated that the water was sea water fossil which interacted with magmatic materials. The water in LUSI-4 location had an age of 18,408 years, which contained  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , and  $^2\text{H}$  of  $-10.5\text{‰}$ ,  $7.68\text{‰}$ , and  $-35.3\text{‰}$  respectively. These data indicated that the water was fresh water, which was not mixed with water from mud. The water age from LUSI-5 location was 14,237 years, and contained  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , and  $^2\text{H}$  of  $-3.00\text{‰}$ ,  $-0.25\text{‰}$ , and  $-21.1\text{‰}$  respectively. These data showed that the water was partially originated from the groundwater and dominated by mud water. The water age at MVKA location was 14,355 years, and contained  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , and  $^2\text{H}$  of  $2\text{‰}$ ,  $2.61\text{‰}$ , and  $-6.6\text{‰}$  respectively. This water was estimated as a mixture of mud water and intruded sea water. Plots of  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{14}\text{C}$  data of water samples of 2009 showed that the water was dominated by groundwater, but the water from LUSI-11 sample was indicated as sea water.

Keywords: environmental isotope, groundwater, mud of Lapindo.

### 1. PENDAHULUAN

Daerah Porong Sidoarjo merupakan salah satu kawasan industri di Jawa Timur sebelum terjadinya tragedi semburan lumpur panas proyek Lapindo. Jalan tol yang menghubungkan kota Malang dan Surabaya merupakan infrastruktur yang melintasi kawasan industri Porong. Demikian pula jalan raya Porong yang menghubungkan Surabaya-Banyuwangi merupakan jalan utama yang memberikan kontribusi terhadap perkembangan pembangunan di sekitarnya. Foto daerah Porong sebelum semburan lumpur Lapindo, yang diambil pada tanggal 6 Oktober 2005 dapat dilihat pada Gambar 1.

Tragedi lumpur panas Lapindo terjadi mulai pada tanggal 27 Mei 2006. Peristiwa tersebut terjadi ketika banjir lumpur panas mulai menggenangi areal persawahan, permukiman penduduk, dan kawasan industri. Semburan lumpur ini membawa dampak negatif bagi masyarakat sekitar maupun bagi aktivitas perekonomian di Jawa Timur. Area genangan lumpur dari waktu ke waktu terus meluas. Jika pada tahun 2007 tanggul penahan lumpur masih berada tidak jauh dari pusat sembur, maka pada tahun 2009 telah mengalami perluasan hingga ke sisi bagian utara. Hal ini diakibatkan volume lumpur dan air yang terus bertambah.



**Gambar 1.** Foto udara daerah Porong sebelum tragedi semburan lumpur Lapindo (Anonim, 2005)

Hingga pertengahan tahun 2007 semburan utama masih didominasi oleh lumpur berwarna hitam pekat dengan sedikit air yang kadang-kadang disertai *crude oil*. Temperatur lumpur sekitar  $110^{\circ}\text{C}$  sesaat setelah keluar dari lubang semburan. Semburan lain yang muncul yang berjarak 300 meter di utara (titik LUSI-3) memiliki temperatur sekitar  $40^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan temperatur air yang keluar di lokasi lain masih normal. Pada tahun 2009 kondisi semburan didominasi oleh air dengan penambahan semburan baru yang muncul di beberapa lokasi.

Sehubungan dengan semburan lumpur yang berlangsung terus-menerus dan disertai munculnya air tanah di beberapa lokasi, maka diperlukan sebuah studi untuk memantau perubahan atau perkembangan mengenai air di area semburan dan sekitarnya. Manfaat penelitian ini adalah memberikan kontribusi untuk mengungkapkan asal-usul dan jenis air tersebut. Dalam penelitian ini ditelaah jenis air yang keluar di area semburan lumpur, apakah tergolong fosil air, air laut, atau air tanah, berdasarkan data  $^{14}\text{C}$  dan  $^{13}\text{C}$ . Penyebab tingginya suhu dapat ditentukan berdasarkan data  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$ .

Pendekatan masalah yang digunakan adalah dengan isotop alam  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , dan  $^2\text{H}$  yang umum digunakan sebagai perunut dalam penelitian air tanah dan panas bumi. Untuk analisis  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  diperlukan sampel air sebanyak 30 mL, sedangkan untuk analisis  $^{13}\text{C}$  dan  $^{14}\text{C}$  diperlukan sampel air sebanyak 60 L yang diekstrak menjadi  $\text{BaCO}_3$ . Sampel-sampel tersebut kemudian dianalisis di Laboratorium Hidrologi dan Panas Bumi PATIR BATAN.

## 2. METODA

### Pengambilan Sampel untuk Analisis Isotop $^{18}\text{O}$ dan $^2\text{H}$

Isotop alam  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  berada di air dalam bentuk senyawa  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  dan  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}_2$ . Kedua isotop tersebut sangat peka terhadap proses fisika seperti penguapan. Oleh karena itu untuk mencegah terjadinya penguapan, maka pengambilan sampel air dilakukan dengan cara memasukkan sampel air sebanyak 20 mL ke dalam botol khusus kedap udara dengan cara mendekatkan botol ke sumber air atau memasukkannya ke dalam sumber air secara langsung. Timbulnya gelembung udara dalam sampel dihindarkan dengan memasukkan sampel secara perlahan-

lahan. Setelah sampel terisi penuh dan tidak ada gelembung udara, botol ditutup hingga kedap udara.

### Pengambilan Sampel untuk Analisis Isotop $^{14}\text{C}$

Isotop  $^{14}\text{C}$  dalam sampel air terdapat dalam bentuk  $\text{CO}_2$  atau  $\text{HCO}_3$  yang terlarut dalam air tanah dan diambil dalam bentuk endapan  $\text{BaCO}_3$ . Sampel air tanah sebanyak 60 L dimasukkan dalam tangki pengendap dan ditambahkan 5 g  $\text{FeSO}_4$  untuk menghilangkan pengaruh mineral sulfida dan mineral lain. Pada sampel tersebut kemudian ditambahkan larutan  $\text{NaOH}$  jenuh sebanyak 40 mL untuk mengatur agar pH sampel menjadi 12. Selanjutnya ditambahkan larutan pengendap  $\text{BaCl}_2$  jenuh sebanyak 500 mL, dan kemudian diaduk hingga terbentuk endapan halus  $\text{BaCO}_3$ . Untuk mempercepat pengendapan ditambahkan praestol sebanyak 30 mL dan diaduk perlahan-lahan. Endapan  $\text{BaCO}_3$  yang telah terbentuk ditampung dalam botol kapasitas 1 L.

### Analisis $^{18}\text{O}$ dan $^2\text{H}$

$^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  (deuterium) dianalisis dengan menggunakan alat spektrometer massa model SIRA-9, VG Isogas. Analisis  $^{18}\text{O}$  dilakukan dengan cara mereaksikan 2 mL sampel air dengan gas  $\text{CO}_2$  dalam botol gelas dan disetimbangkan pada suhu  $30^\circ\text{C}$  selama 8 jam dalam alat preparasi sampel Isoprep-18. Selanjutnya gas  $\text{CO}_2$  dialirkan ke dalam spektrometer massa untuk penentuan kandungan isotop stabil. Pengukuran kandungan  $^2\text{H}$  (deuterium) dilakukan dengan mereaksikan 10  $\mu\text{L}$  sampel air dengan 300 mg Zn aktif dalam kondisi vakum. Campuran tersebut lalu dipanaskan pada suhu  $450^\circ\text{C}$  selama 30 menit hingga gas  $^2\text{H}$  terbentuk dengan O tereduksi menjadi  $\text{ZnO}$ , yang seterusnya gas  $^2\text{H}$  dialirkan ke dalam spektrometer massa.

Sejak tahun 1950, penelitian dengan isotop stabil menjadi sangat populer dengan adanya

perkembangan peralatan spektrofotometer. Metoda ini dapat menentukan secara tepat rasio kelimpahan isotop. Dalam penelitian ini hal yang sangat menarik adalah rasio isotop-isotop molekul air seperti  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  dan  $^2\text{H}/^1\text{H}$ . Rasio yang ditimbulkan dikenal dengan delta ( $\delta$ ) dalam permill (‰) merupakan perbedaan relatif antara sampel dan standar yang dikenal dengan *Standard Mean Ocean Water (SMOW)*.

$$\delta \text{‰} = [(R-R_{\text{standar}})/R_{\text{standar}}] \times 1000$$

Keterangan: R dan  $R_{\text{standar}}$  adalah rasio isotop  $^2\text{H}/^1\text{H}$  atau  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

Variasi isotop air mempunyai sedikit perbedaan dalam tekanan uap dan titik beku. Kedua sifat ini memberikan perbedaan konsentrasi  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dalam air untuk bermacam-macam tempat dalam siklus hidrologi. Kandungan isotop suatu senyawa berubah bila terjadi proses evaporasi, kondensasi, pembekuan, pencairan, reaksi kimia atau proses biologi yang umum dikenal dengan fraksinasi isotop (IHP-V, 2000).

Pada prinsipnya analisis  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dalam penelitian dinamika air suatu daerah adalah berdasarkan perbedaan kandungan isotop stabil  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  di antara sumber air yang terdapat di daerah penelitian seperti air sungai, air tanah, air danau, reservoir, atau air laut. Kandungan isotop stabil  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dari air sungai akan terjadi pengkayaan yang disebabkan oleh proses penguapan. Di lain pihak air tanah akuifer dangkal dan air tanah akuifer dalam di daerah tersebut dapat berasal dari imbuhan lokal ataupun regional yang akan memperlihatkan perbedaan diantara sumber-sumber air yang dipelajari (IAEA-TECDOC-713, 1993 dan Verhagen dan Butler, 1997).

Komposisi  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  air tanah yang berasal dari infiltrasi air hujan ke dalam tanah akan terletak pada garis meteorik (air hujan), kecuali air tanah tersebut

mengalami perubahan misalnya mengalami pertukaran  $^{18}\text{O}$  karena melewati magma, pencampuran, atau telah mengalami proses penguapan. Grafik pada Gambar 2 memperlihatkan komposisi  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dalam berbagai proses.

**Analisis  $^{14}\text{C}$  dan  $^{13}\text{C}$**

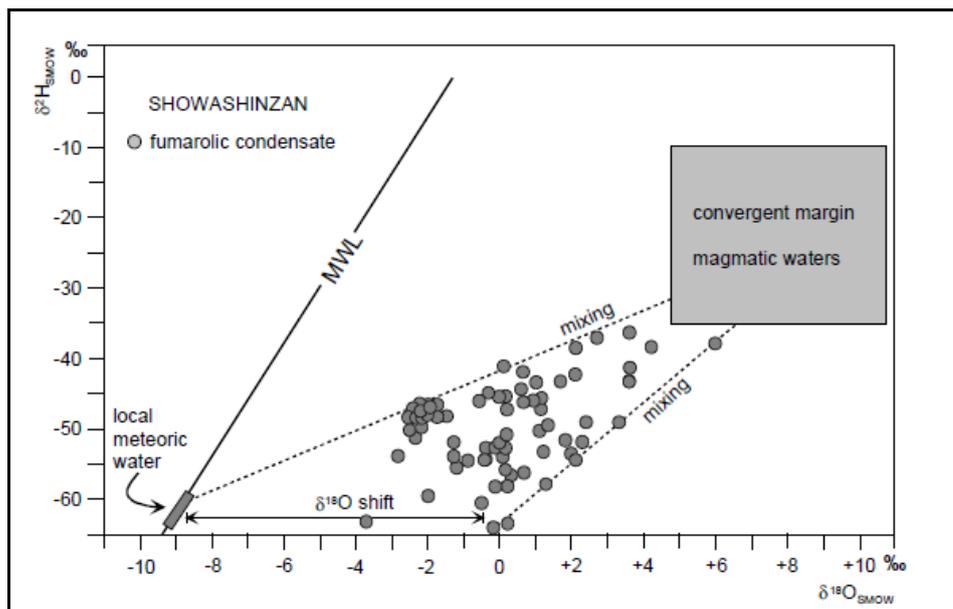
Metoda isotop alam adalah metoda yang menggunakan isotop yang terdapat di alam atau yang terjadi di alam. Dalam penelitian ini digunakan isotop alam  $^{14}\text{C}$ . Radioisotop  $^{14}\text{C}$  dengan waktu paruh 5.730 tahun telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian seperti penentuan umur batuan, sedimen, karang, kerang, air tanah, dan lain-lain. Metoda penentuan umur ini dikenal dengan nama metoda penanggalan radiokarbon, yaitu suatu metoda yang didasarkan pada perhitungan aktivitas  $^{14}\text{C}$  yang masih terkandung dalam suatu sampel. Nilai ini kemudian dikonversikan menjadi umur setelah dibandingkan dengan standarnya (Aravena *et al.*, 1989). Standar yang digunakan dalam analisis  $^{14}\text{C}$  adalah SRM 4990C dari NBS USA.

Secara garis besar proses analisis  $^{14}\text{C}$  untuk sampel air tanah meliputi preparasi

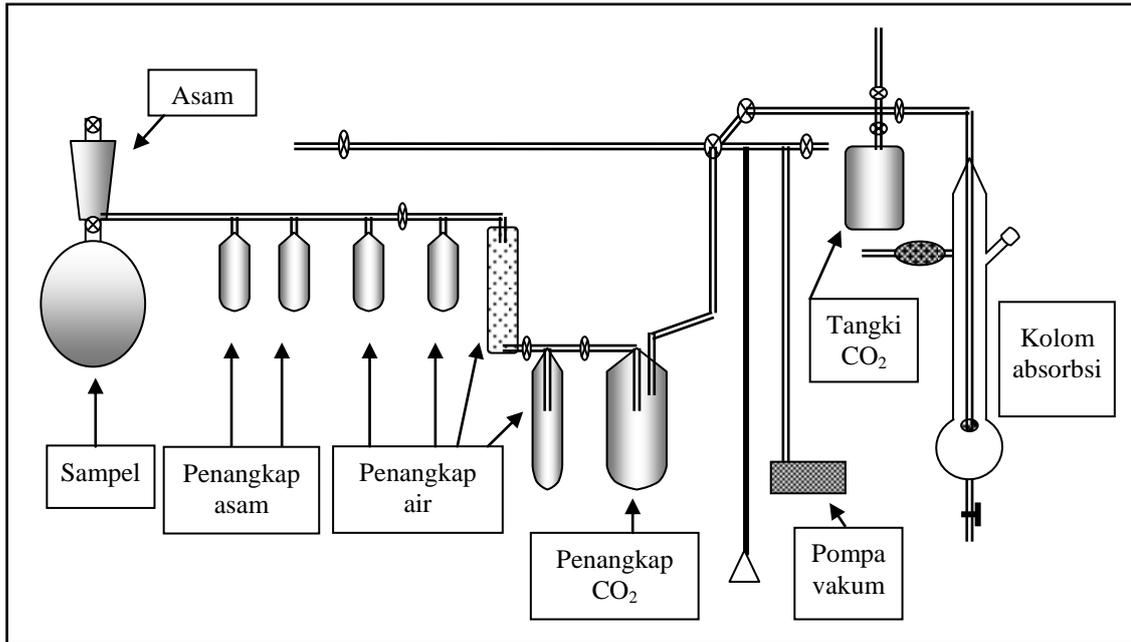
sampel pada alat sintesis benzena, pencacahan sampel, estimasi aktivitas  $^{14}\text{C}$  sampel, penentuan umur sampel, dan pelaporan umur sampel (Gupta, Sushil, dan Polach, 1985).

Sampel air untuk analisis  $^{14}\text{C}$  diambil langsung dari sumbernya untuk menghindari adanya kontaminasi udara. Sebanyak 60 L sampel air dimasukkan ke dalam tabung pengendap karbonat. Proses pengendapan karbonat dilakukan dengan cara menambahkan sejumlah larutan kimia seperti  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaOH}$  (bebas  $\text{CO}_2$ ),  $\text{BaCl}_2$ , dan praestol dalam kondisi basa. Proses ini menghasilkan endapan sampel dalam bentuk  $\text{BaCO}_3$ . Endapan  $\text{BaCO}_3$  yang dianalisis guna menentukan kandungan  $^{14}\text{C}$  dan  $^{13}\text{C}$  (Hut, 1987).

Analisis isotop  $^{14}\text{C}$  dilakukan dengan metode *carbosorb* yaitu dengan cara melakukan penyerapan  $\text{CO}_2$ , baik  $\text{CO}_2$  yang berasal dari sampel, latar belakang, maupun standar dengan penyerap *carbosorb* yang telah dicampur dengan sintilator. Fungsi dari sintilator ini adalah untuk mengubah emisi  $\beta$  dari  $^{14}\text{CO}_2$  menjadi foton-foton cahaya (Qureshi *et al.*, 1989).

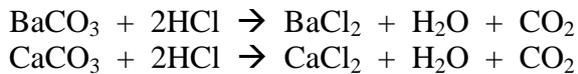


Gambar 2. Perubahan komposisi isotop dalam berbagai proses



**Gambar 3.** Rangkaian alat absorpsi CO<sub>2</sub>

Dalam kondisi vakum, sampel karbonat dalam bentuk senyawa BaCO<sub>3</sub> atau CaCO<sub>3</sub> direaksikan dengan HCl 10% sehingga diperoleh CO<sub>2</sub> melalui reaksi berikut.



Sebanyak kira-kira 5 L CO<sub>2</sub> ditampung dalam tabung *stainless steel*, untuk selanjutnya dialirkan ke kolom absorpsi yang telah diisi dengan 35 mL larutan sintilator dan *carbosorb*. Setelah proses absorpsi selesai, larutan yang terbentuk langsung dikururkan ke dalam labu erlenmeyer sambil dialiri gas N<sub>2</sub>. Sebanyak 21 mL larutan tersebut diambil dan dituangkan ke dalam *vial* gelas 21 mL dengan menggunakan pipet volumetrik. Radioisotop <sup>14</sup>C yang terkandung dalam <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> kemudian dicacah dalam pencacah sintilasi cair selama 20 menit, dengan 50 kali ulangan (Qureshi *et al.*, 1995 dan Nair *et al.*, 1995). Rangkaian alat penyerap CO<sub>2</sub> dengan *carbosorb* dapat dilihat pada Gambar 3.

Perhitungan umur dihitung dengan memasukkan nilai isotop stabil  $\delta^{13}\text{C}$  yang diukur menggunakan spektrometer massa. Berdasarkan perhitungan konvensional,

Ri = 100. Penentuan umur air tanah, evaluasi, dan faktor koreksi perhitungan umur air tanah dapat ditentukan dengan mengikuti formula sebagai berikut:

$$t = 8267 \ln (R_i/R_s)$$

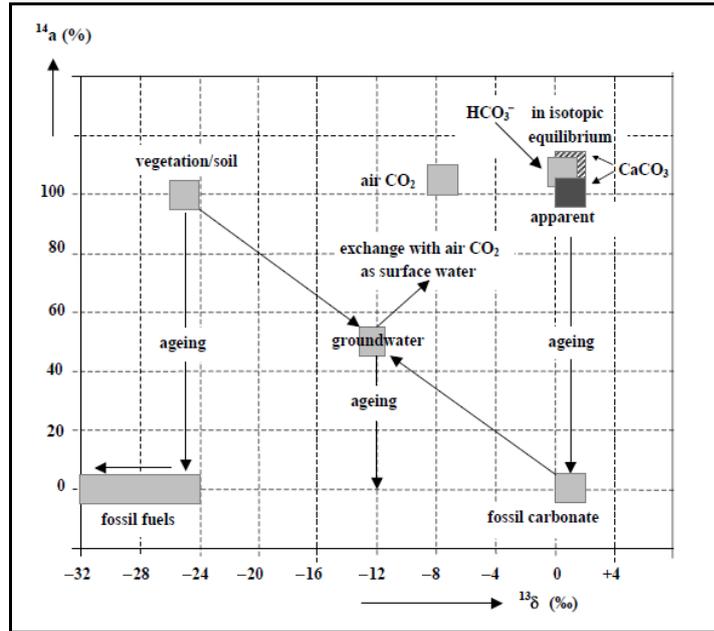
dimana:

Ri = konsentrasi/kandungan isotop <sup>14</sup>C awal  
Rs = nilai *percent modern carbon* (PMC) sampel

Penentuan umur menggunakan radioisotop <sup>14</sup>C melibatkan pula koreksi isotop stabil dari unsur <sup>6</sup>C<sup>12</sup> dan <sup>6</sup>C<sup>13</sup> melalui persamaan di bawah ini. Standar yang digunakan untuk analisis <sup>13</sup>C adalah PDB (Pee Dee Belemnite).

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

Analisis <sup>13</sup>C dilakukan dengan alat spektrometer massa. Isotop stabil <sup>13</sup>C juga dapat mengindikasikan asal air melalui perbedaan nilai yang dikandungnya seperti terlihat pada Gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat bahwa air segar (*fresh water*) memiliki nilai <sup>13</sup>C sekitar -12‰ hingga -14, sedangkan air laut antara 0 hingga +2‰.



Gambar 4. Skema variasi hubungan antara  $^{13}\text{C}$  dan  $^{14}\text{C}$  di alam



Gambar 5. Lokasi pengambilan sampel air di area lumpur Lapindo (2007)

### 3. HASIL ANALISIS

Foto daerah Porong setelah peristiwa semburan lumpur Lapindo serta lokasi pengambilan sampel yang terdiri atas LUSI-1, LUSI-2, LUSI-3, LUSI-4, dan LUSI-5 dapat dilihat pada Gambar 5. Lokasi MVKA terletak di Desa Kalanganyar dan berjarak sekitar 17 km sebelah utara area semburan sehingga tidak tampak pada gambar. Lumpur yang keluar di lokasi MVKA ini berupa

letupan-letupan kecil dan telah lama muncul jauh sebelum peristiwa semburan lumpur terjadi.

#### Evaluasi Hasil Analisis $^{18}\text{O}$ dan $^2\text{H}$

Tabel 1 merupakan hasil analisis  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dari sampel air yang berasal dari pusat semburan dan air yang keluar di sekitarnya. Lokasi pengambilan sampel LUSI-1 dan LUSI-2 berdekatan, tetapi asalnya tetap dari pusat semburan.

**Tabel 1.** Hasil analisis  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  air area lumpur Lapindo (2007)

No.	Kode Sampel	$^{18}\text{O}$ (‰)	$^2\text{H}$ (‰)
1	LUSI-1	7,79	-11,3
2	LUSI-2	8,96	-6,6
3	LUSI-3	5,28	-17,5
4	LUSI-4	-7,68	-35,3
5	LUSI-5	-0,25	-21,1
6	MVKA	2,61	-6,6

Hasil penelitian pada Gambar 6 menunjukkan bahwa kandungan  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  yang berasal dari pusat semburan LUSI-1 bernilai 7,79‰ dan -11,3‰, kemudian LUSI-2 8,96‰ dan 6,6‰ yang mengindikasikan air tersebut merupakan air yang telah berinteraksi dengan magma. Temperatur lumpur panas yang mencapai 100°C semakin menguatkan dugaan bahwa air tersebut merupakan air yang berinteraksi dengan magma. Gunung api yang terdekat dengan area semburan adalah Gunung Penanggungan yang terletak sekitar 14 km di sebelah barat daya. Diperkirakan bahwa air yang keluar di pusat semburan, sebelumnya telah berinteraksi dengan magma dari gunung api tersebut.

Di lokasi LUSI-3, kandungan  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  bernilai 5,28 dan -17,5‰ yang mengindikasikan air tersebut juga berasal dari pusat semburan walaupun lokasinya sudah bergeser sekitar 300 m ke arah utara yang muncul sebagai semburan baru. Hal ini dimungkinkan karena tanah di area lumpur mengalami penurunan sehingga terbentuk rongga atau rekahan yang memungkinkan air tanah keluar di bagian sisi lain.

Di lokasi LUSI-4, nilai  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  masing-masing -7,68‰ dan -35,3‰. Nilai tersebut umumnya dijumpai pada air tanah segar yang berasal dari akuifer dalam. Air tersebut muncul sebagai air artesis. Maka dapat diperkirakan bahwa asal air tersebut dari suatu ketinggian dan masuk ke akuifer dalam. Air artesis yang terletak di Desa Jatirejo ini muncul dengan sendirinya. Hal ini sangat mungkin karena terjadinya keretakan tanah di bawahnya akibat penurunan tanah sehingga

terbentuk rekahan yang memberikan jalan air keluar melalui rekahan. Nilai  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  tersebut menunjukkan pula bahwa air artesis yang keluar belum mengalami pencampuran dengan air dari lumpur.

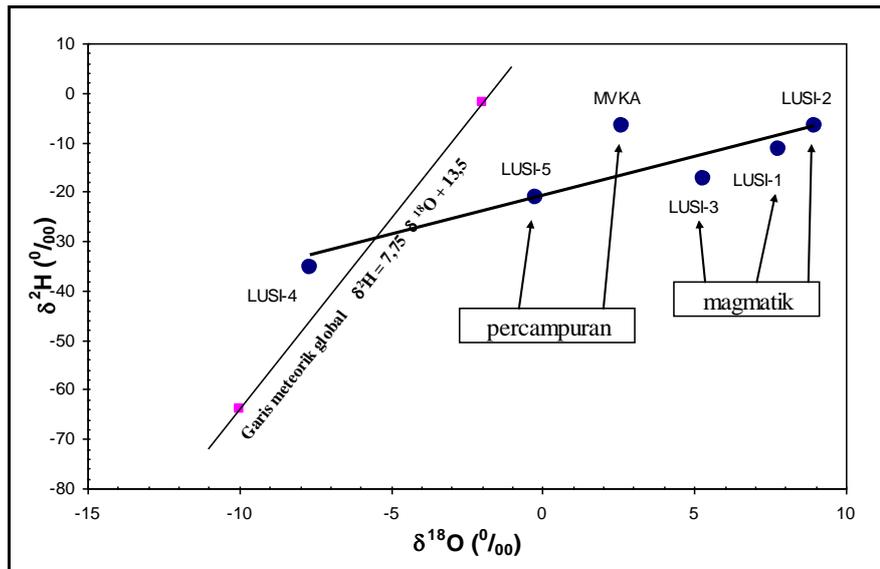
Hasil penelitian untuk LUSI-5 memiliki kandungan  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sebesar -0,25‰ dan -21,1‰. Nilai ini menunjukkan adanya pencampuran antara air tanah ( $^{18}\text{O}$  air tanah akuifer dalam umumnya sekitar -7‰) dengan air dari lumpur panas yang memiliki kandungan  $^{18}\text{O}$  antara 7-9‰. Sedangkan di lokasi MVKA nilainya 2,61‰ dan -6,6‰ yang menunjukkan air percampuran antara air laut ( $^{18}\text{O} = 0‰$ ) dengan air dari lumpur.

Jenis air yang keluar, baik yang berasal dari pusat semburan maupun yang ada di sekitarnya selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 6. Data pendukung untuk menjelaskan jenis air tersebut dibahas melalui data  $^{13}\text{C}$  dan  $^{14}\text{C}$ .

#### Evaluasi Hasil Analisis $^{13}\text{C}$ dan $^{14}\text{C}$

Analisis  $^{14}\text{C}$  untuk menentukan umur air hanya dilakukan pada lokasi di luar pusat semburan. Hal ini disebabkan karena pemisahan air dari lumpur cukup sulit dan memerlukan waktu lama. Diperlukan sedikitnya 60 L sampel air untuk proses ekstraksi  $^{14}\text{C}$  menjadi  $\text{BaCO}_3$ . Sampel air untuk analisis  $^{14}\text{C}$  diambil pada empat lokasi, yaitu LUSI-3, LUSI-4, LUSI-5, dan MVKA.

Hasil analisis  $^{14}\text{C}$  di lokasi LUSI-3, umur airnya sudah tidak terukur (0 PMC, artinya sudah diluar kemampuan ukur alat *Liquid Scintillation Counter*. Sesuai batas ukur alat, umurnya melebihi 40.000 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa air tersebut merupakan fosil air yang sudah terjebak bersama lumpur dalam kurun waktu sangat lama, ratusan ribu hingga jutaan tahun lalu. Hasil ini didukung dengan kandungan  $^{13}\text{C}$  sebesar 1,58‰ yang mengindikasikan bahwa air tersebut merupakan air laut yang telah lama terjebak.



**Gambar 6.** Grafik hubungan  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  pada sampel air dari area lumpur Lapindo tahun 2007

Umur air dan  $^{13}\text{C}$  di lokasi LUSI-4 masing-masing 18.408 tahun dan  $-10,5\%$  merupakan air tanah yang keluar akibat keretakan struktur tanah (*land subsidence*). Sehingga air tanah yang berasal dari akuifer dalam menembus rekahan-rekahan tanah dan muncul sebagai air artesis. Data  $^{13}\text{C}$  menunjukkan bahwa air tersebut merupakan air segar yang tidak mengalami pencampuran dengan air dari lumpur. Kandungan  $^{13}\text{C}$  air tanah segar (*fresh water*) umumnya berkisar antara  $-10\%$  hingga  $-14\%$ . Data  $^{14}\text{C}$  ini mendukung data  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  yang memberikan fakta bahwa air tersebut air segar yang berasal dari akuifer dalam.

Umur air yang keluar di lokasi LUSI-5 adalah 14.237 tahun. Nilai  $^{13}\text{C}$  sebesar  $-3\%$  menunjukkan bahwa air tersebut merupakan air tanah yang tercampur dengan air yang keluar dari rembesan lumpur, sehingga nilainya lebih *enriched*. Nilai  $^{13}\text{C}$  sebesar  $-3\%$  menunjukkan pencampuran yang didominasi air rembesan lumpur.

Lokasi MVKA terletak di Desa Kalanganyar dengan jarak sekitar 17 km di sebelah utara area lumpur Lapindo dan 5 km dari Laut Madura. Air tanah di lokasi ini berumur 14.355 tahun dengan nilai  $^{13}\text{C}$  sebesar  $2\%$ .

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air tersebut berasal dari intrusi air laut yang kemudian bercampur dengan air dari lumpur. Secara umum air laut memiliki kandungan  $^{13}\text{C}$  antara  $0-2\%$ .

**Tabel 2.** Hasil analisis umur air tanah dengan  $^{14}\text{C}$  area lumpur Lapindo (2007)

No.	Kode Sampel	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	PMC	Umur (tahun)
1	LUSI-3	1,58	0,00*	>40.000*
2	LUSI-4	-10,50	9,04	18.408
3	LUSI-5	-3,00	14,97	14.237
4	MVKA	2,00	14,76	14.355

\* nilai PMC (*percent mode carbon*) = 0,0 artinya aktivitas  $^{14}\text{C}$  sudah tidak terukur, berada di luar kemampuan alat sehingga diperkirakan umurnya lebih dari 40.000 tahun.

Pada akhir tahun 2009 dilakukan pengambilan sampel air di beberapa lokasi, yaitu di area semburan utama (LUSI-6, LUSI-8, dan LUSI-11) dan di luar area semburan (LUSI-7, LUSI-9, dan LUSI-10) seperti dapat dilihat pada Gambar 7. Sedangkan sampel air yang berasal dari pusat semburan tidak diambil, karena posisinya yang agak sulit dijangkau.

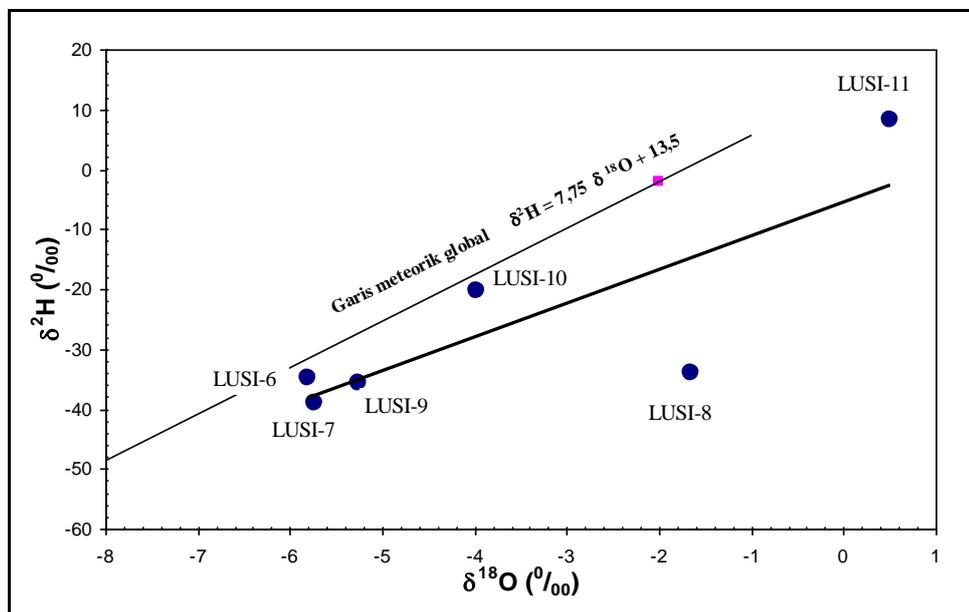
Hasil analisis isotop alam  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ , dan  $^{14}\text{C}$  dari sampel air yang diambil di sekitar area lumpur Lapindo dapat dilihat pada Tabel 3. Data  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  selanjutnya diplotkan ke dalam grafik hubungan  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Lokasi pengambilan sampel air di area lumpur Lapindo (2009)

Tabel 3. Kandungan isotop alam <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, dan <sup>14</sup>C air area lumpur Lapindo (2009)

No.	Kode Sampel	<sup>18</sup> O (‰)	<sup>2</sup> H (‰)	PMC	Umur (tahun)
1	LUSI-6	-5,81	-34,8	6,05 ± 0,34	21.723 ± 900
2	LUSI-7	-5,74	-39,0	17,17 ± 0,85	12.818 ± 600
3	LUSI-8	-1,66	-34,1	73,28 ± 1,50	1.107 ± 60
4	LUSI-9	-5,25	-35,8	9,57 ± 0,43	17.932 ± 800
5	LUSI-10	-3,98	-20,2	9,15 ± 0,42	18.310 ± 800
6	LUSI-11	0,5	8,13	78,43 ± 1,85	545 ± 50



Gambar 8. Grafik hubungan <sup>2</sup>H dan <sup>18</sup>O pada sampel air dari area lumpur Lapindo tahun 2009.

Semburan baru yang muncul di luar area semburan utama umumnya berasal dari sumur-sumur penduduk. Berdasarkan data isotop alam <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, dan <sup>14</sup>C (umur air) pada Tabel 3 terlihat bahwa sebagian besar air yang

muncul di beberapa lokasi didominasi air tanah.

Air yang muncul di lokasi LUSI-8 (outlet) diduga berasal dari lokasi yang sama (LUSI-6,

LUSI-7, atau LUSI-9), akan tetapi sepanjang perjalanannya telah mengalami pertukaran  $^{18}\text{O}$  dengan  $^{16}\text{O}$  dari batuan atau lumpur yang dilewatinya. Hal ini dapat dilihat dari pergeseran kandungan isotop  $^{18}\text{O}$  yang semakin *enriched*. Sedangkan air yang muncul di LUSI-11 yang diduga berasal dari air laut, dengan kandungan  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sebesar 0‰ dan umurnya cenderung muda (modern). Bila dibandingkan dengan kondisi air pada tahun 2007 yang lebih didominasi fosil air dan lumpur, maka kondisi air pada tahun 2009 lebih didominasi air tanah atau air laut.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil analisis  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  pada sampel tahun 2007 dari pusat semburan (LUSI-1, LUSI-2, dan LUSI-3) menunjukkan asal air lumpur merupakan hasil interaksi dengan magma. Sedangkan hasil analisis  $^{14}\text{C}$  memberikan indikasi bahwa air yang keluar di lokasi LUSI-2 dan LUSI-3 merupakan fosil air yang terjebak. Air artesis yang keluar di lokasi LUSI-4 merupakan air segar yang tidak mengalami pencampuran dengan air lumpur. Sedangkan air yang keluar di LUSI-5 merupakan air tanah yang mengalami pencampuran dengan air dari rembesan lumpur. Air yang keluar dari MVKA merupakan hasil pencampuran antara intrusi air laut dengan air dari lumpur.

Hasil analisis isotop alam yang sampelnya diambil akhir tahun 2009 menunjukkan bahwa sebagian besar air yang muncul di beberapa lokasi didominasi air tanah. Hanya air yang keluar dari LUSI-11 yang diduga berasal dari air laut.

#### DAFTAR PUSTAKA

Anonim (2005). Foto Udara Daerah Porong. <http://www.crisp.nus.edu.sg>.

Aravena, R.O., Drimmie, R.R., Qureshi, R.M., McNeely, R., dan Fabris, S. (1989). New Possibilities for  $^{14}\text{C}$

Measurements by Liquid Scintillation Counting. *Radiocarbon*. 31(3). 387-392.

Gupta, Sushil, K., dan Polach, H. (1985). Radiocarbon Dating Practice at Australian National University, Handbook. Radiocarbon Laboratory, Research School of Pacific Studies, ANU, Canberra.

Hut, G. (1987). Isotope Hydrology, Diktat Training Course Isotope Hydrology IAEA. 30-41.

IAEA-TECDOC-713 (1993). Nuclear Techniques in The Study of Pollutant Transport in The Environment. IAEA, Vienna.

IHP-V (2000). Environmental Isotopes in The Hydrological Cycle. UNESCO-IAEA. 39 (1).

Nair, A.R., Sinha, U.K., Josep, T.B., dan Rao, S.M. (1995). Radiocarbon Dating up to 37,000 Years Using  $\text{CO}_2$  Absorption Technique. *Nuclear Geophysics*. 9(3). 263-268.

Qureshi, R.M., Aravena, R.O., Fritz, P., dan Drimmie, R. (1989). The  $\text{CO}_2$  Absorption Method as Alternative to Benzene Synthesis Method for  $^{14}\text{C}$  Dating. *Applied Geochemistry*. 4. 625-633.

Qureshi, R.M., Aravena, R.O., Drimmie, R., dan Fritz, P. (1995). A Simple Preparatory Procedure for LSC  $^{14}\text{C}$  Dating of Environmental Samples with Ages Younger than 29,000 Years. *Proceedings National Symposium Spectroscopy for Material Analysis*. Islamabad-Pakistan, April 4-6.

Verhagen, B.T. dan Butler M.J. (1997). Environmental Isotope Studies of Urban and Waste Disposal Impact on Groundwater Resources in South Africa, Isotope Techniques in The Study of Environmental Change. *Proceedings Symposium IAEA*. Vienna. 411-421.