

## Aplikasi Isotop Alam untuk Mengetahui Asal-Usul Air Umbul Cokro, Kecamatan Tulung, Kabupaten Klaten

Harry Leo Kharisma<sup>1</sup>, Agus Budhie Wijatna<sup>2</sup>, Wahyu Wilopo<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Alumni Jurusan Teknik Fisika FT UGM, Jln. Grafika No.2 Yogyakarta

<sup>2)</sup> Jurusan Teknik Fisika FT-UGM, Bulaksumur Yogyakarta

<sup>3)</sup> Jurusan Teknik Geologi FT UGM, Jln. Grafika No.2 Yogyakarta

### Abstract

*Determination of the groundwater origin of Umbul (spring) Cokro, at Klaten has been done by using environmental isotope tracers, i.e. carbon-13, deuterium, and oxygen-18. Groundwater samples were taken from springs and wells in surround of it, i.e. Wajong Wetan, Kemiri, Karang Podang, Sodong, and Karang Kendal. In the mean time, determination of groundwater genesis has been conducted by analyzing the composition of deuterium (<sup>2</sup>H) and oxygen-18 (<sup>18</sup>O) using mass spectrometer. While the direction of groundwater which has the same genesis is determined by analyzing of carbon-13 composition and will be verified by hydraulic gradient. If the composition of sample from surround is almost equal with sample from spring, hence groundwater from well flows to spring.*

*The result of this research showed that  $\delta^{13}\text{C}$  composition of each sample is  $-12,92 \pm 4,20$  until  $5,56 \pm 4,31$  ‰ PDB, that means that the sample include in Groundwater Dissolved Inorganic Carbon; while analysis of deuterium and oxygen-18 indicated that composition of groundwater molecule in Sodong, Karang Podang, and Karang Kendal are almost equal to the spring, with  $\delta\text{D}$  composition =  $-52,00 \pm 0,77$  ‰ and  $\delta^{18}\text{O}$  composition =  $-9,16 \pm 0,28$  ‰ to Standard Mean Ocean Water (SMOW). Based on those results, groundwater of Umbul Cokro originally from Sodong, Karang Podang, and Karang Kendal.*

**Keywords:** groundwater, recharge area, Umbul Cokro, environmental isotope tracer.

### 1. Pendahuluan

Upaya melestarikan airtanah menjadi isu strategis akhir-akhir ini, terutama sejak meningkatnya kebutuhan airtanah secara signifikan untuk memenuhi kebutuhan rumahtangga, pertanian, maupun industri.

Pemanfaatan airtanah secara optimal memerlukan manajemen pengelolaan yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Umbul Cokro merupakan mataair yang terbesar dari lebih kurang 174 mataair di lereng timur Gunung Merapi. Sebagian besar air dari mataair tersebut digunakan untuk irigasi pertanian. Berdasarkan data yang diperoleh dari Sub Dinas Pengairan Kabupaten Klaten, debit air yang digunakan untuk irigasi pertanian mencapai 1400 liter per detik. Umbul Cokro juga merupakan

supplier bagi Perusahaan Daerah Air Minum Surakarta dan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Cokro. Mengingat pentingnya peran Umbul Cokro tersebut, maka perlu dilakukan penelitian untuk menentukan asal-usul air Umbul Cokro, agar daerah dimana air Umbul Cokro berasal dapat dikonservasi sehingga debit Umbul Cokro tetap terjaga.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui asal-usul air yang mengalir ke Umbul Cokro.

### 2. Tinjauan Pustaka

Telah dilakukan penelitian untuk menentukan arah aliran airtanah dengan metode penentuan umur airtanah dengan tritium (*use of tritium for groundwater dating*) di kawasan pertanian intensif/daerah tangkapan air di Desa Tawang

Argo, Kecamatan Karangploso, Kabupaten Malang (Hendrayana dkk., 1996). Lokasi pengambilan sampel diklasifikasikan menjadi 2 area, yaitu kawasan pertanian (hulu/utara) dan kawasan sekitar mataair Sumbersari (hilir/tenggara). Penentuan arah aliran airtanah dilakukan dengan cara menentukan laju cacah tritium ( $^3\text{H}$ ) masing-masing sampel menggunakan *Liquid Scintillation Counting System*. Berdasarkan laju cacah tersebut, kemudian dihitung umur masing-masing sampel airtanah. Penentuan arah aliran air tanah ditentukan berdasarkan perbedaan umur airtanah di masing-masing lokasi pengambilan sampel. Penentuan genesis airtanah ditentukan berdasarkan komposisi deuterium ( $^2\text{H}$ ) dan oksigen-18 ( $^{18}\text{O}$ ) masing-masing sampel airtanah menggunakan spektrometer massa.

Penelitian yang serupa juga pernah dilakukan untuk menentukan daerah imbuhan airtanah Bekasi dengan penanggalan karbon-14 ( $^{14}\text{C}$ ) dan isotop stabil  $^{18}\text{O}$  (Syafalni dkk., 2001). Hasil penelitian menunjukkan bahwa airtanah di daerah selatan Bekasi memiliki umur yang muda. Hal tersebut menunjukkan bahwa daerah resapan air Bekasi berada di daerah selatan Bekasi. Selanjutnya, hasil analisis isotop stabil  $^{18}\text{O}$  menunjukkan bahwa daerah resapan Bekasi berasal dari daerah Bantar Gebang dan sekitarnya.

Dalam penelitian ini, penentuan arah aliran airtanah ditentukan berdasarkan perbedaan ketinggian muka airtanah dan sifat alami air yang mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah karena adanya gaya gravitasi. Analisis komposisi karbon-13 dilakukan untuk memastikan apakah aliran airtanah tersebut mengalir melalui media yang sama.

### 3. Dasar Teori

Aplikasi isotop alam yang meliputi deuterium (D atau  $^2\text{H}$ ) dan oksigen-18 ( $^{18}\text{O}$ ) telah dikembangkan lebih dari 3 dekade yang lalu dan kini menjadi metode yang banyak digunakan untuk menentukan beberapa parameter dalam siklus hidrologi yang sulit dilakukan secara konvensional, misalnya penentuan asal-usul airtanah dan daerah resapan, yang terkait dengan potensi akuifer.

Isotop hidrogen dan oksigen merupakan unsur-unsur terpenting dalam siklus hidrologi yang masing-masing memiliki 3 buah isotop. Lebih kurang 99,98% adalah jenis hidrogen-1 ( $^1\text{H}$ ), 0,02% adalah hidrogen-2 ( $^2\text{H}$ ) dan hidrogen-3 ( $^3\text{H}$ ) dalam jumlah yang sedikit yaitu sekitar  $10^{-14}$ , sedangkan untuk isotop oksigen yang terdapat di alam, lebih kurang 99,76% adalah jenis oksigen-16 ( $^{16}\text{O}$ ), 0,04% adalah jenis oksigen-17 ( $^{17}\text{O}$ ) dan 0,20% adalah jenis oksigen-18 ( $^{18}\text{O}$ ). Isotop hidrogen dan oksigen tersebut merupakan unsur utama penyusun air ( $\text{H}_2\text{O}$ ), yaitu isotop stabil  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$ . Isotop-isotop yang lebih berat,  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  memiliki kelimpahan relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan isotop-isotop yang lebih ringan, hidrogen ( $^1\text{H}$ ) dan oksigen-16 ( $^{16}\text{O}$ ). Rasio  $^2\text{H}/^1\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  memiliki nilai yang berbeda untuk setiap lokasi. Konsentrasi isotop-isotop alam tersebut dapat ditentukan dengan spektrometer massa. Karena rasio  $^2\text{H}/^1\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  sangat kecil, maka untuk memudahkan rasio isotop  $^2\text{H}/^1\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  dinyatakan relatif terhadap standar internasional, yakni *Standard Mean Ocean Water* (SMOW) dan hubungannya dinyatakan sebagai berikut:

$$\delta = \frac{R_s - R_{st}}{R_{st}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta D, \text{‰} = 1000 \times \frac{\left[ \left( \frac{D}{H} \right)_{\text{sampel}} - \left( \frac{D}{H} \right)_{\text{smow}} \right]}{\left( \frac{D}{H} \right)_{\text{smow}}} \quad (2)$$

$$\delta^{18}\text{O}, \text{‰} = 1000 \times \frac{\left[ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{sampel}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{smow}} \right]}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{smow}}} \quad (3)$$

Dengan  $\delta$  = nilai komposisi, dinyatakan dalam per mil (‰),  $R_s$  adalah rasio isotop ( $^2\text{H}/^1\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) stabil dari sampel dan  $R_{st}$  adalah rasio isotop stabil ( $D/^1\text{H}$  atau  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) dari standar. Jika nilai  $\delta$  positif, maka menunjukkan sampel memiliki komposisi isotop lebih besar dari standar (lebih *enrich*), sedangkan jika nilai  $\delta$  negatif, menunjukkan bahwa komposisi isotop sampel lebih kecil dari standar.

Sebagian besar isotop-isotop hidrogen dan oksigen yang terkandung di dalam air dalam bentuk molekul-molekul seperti  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{H}^3\text{H}^{16}\text{O}$ , dan  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ . Perbedaan komposisi isotop penyusun molekul air ini menyebabkan molekul

air memiliki sifat-sifat kimia yang sama namun memiliki sifat fisika yang berbeda. Oleh karena itu ketika isotop alam mengikuti siklus hidrologi dan komposisinya akan tetap selama siklus yang terjadi pendek dan temperatur rendah (kecuali *tritium* yang mengalami peluruhan), sehingga isotop-isotop ini sangat tepat untuk penelitian hidrologi.

Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa hubungan antara kelimpahan deuterium ( $\delta^2\text{H}$ ) dan oksigen-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) suatu sampel air menunjukkan hubungan yang linier dengan persamaan berikut:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d \tag{4}$$

Dimana  $d$  tergantung dari faktor geografis suatu daerah, dan untuk sampel air yang telah mengalami penguapan memiliki harga *slope* kurang dari 8, karena kecepatan penguapan maupun difusitas dari  $^1\text{H} \ ^2\text{H}^{16}\text{O}$  lebih besar dari  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Hal ini disebabkan karena  $^1\text{H} \ ^2\text{H}^{16}\text{O}$  lebih mudah menguap bila dibandingkan  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Sebagai contoh, untuk sampel air hujan yang diperoleh dari 91 stasiun bumi di seluruh dunia diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \tag{5}$$

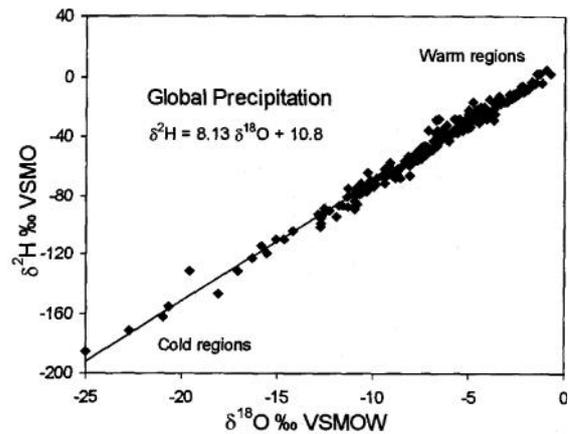
Selanjutnya persamaan (5) disebut *Global Meteoric Water Line* (GMWL), sedangkan untuk daerah-daerah di Indonesia, para peneliti BATAN melalui berbagai stasiun penadah hujan di Indonesia memperoleh hubungan sebagai berikut :

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 14 \tag{6}$$

Selanjutnya persamaan (6) disebut *Local Meteoric Water Line* (LMWL).

Isotop  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  tidak hanya dimanfaatkan untuk interpretasi kualitatif, akan tetapi juga dapat dikomplementerkan dengan teknik konvensional untuk interpretasi potensi *recharge* air hujan ( $Rch$ ), dalam hal ini untuk menentukan volume air imbuhan. Volume air imbuhan merupakan besaran yang menyatakan banyaknya air yang meresap atau infiltrasi ke dalam tanah di daerah resapan air dalam satuan mm/tahun, yang ditentukan melalui persamaan berikut:

$$Rch = P - (Ro + Et) \tag{7}$$



**Gambar 1.** Hubungan antara  $\delta^2\text{H}$  dan  $\delta^{18}\text{O}$  dari presipitasi di berbagai lokasi di dunia (*Environmental Isotopes in The Hydrological Cycle IHP-V UNESCO*)

Dengan  $P$  adalah curah hujan rerata dalam satuan mm/tahun,  $Et$  adalah besaran evapotranspirasi dalam satuan mm/tahun, dan  $Ro$  adalah besaran *run off* dalam satuan mm/tahun.

Evapotranspirasi merupakan besaran yang menyatakan banyaknya air yang mengalami evaporasi di permukaan tanah dan transpirasi oleh tumbuh-tumbuhan. Evapotranspirasi merupakan jumlah total dari evaporasi dan transpirasi yang dapat ditentukan melalui persamaan Penman-Monteith berikut :

$$\lambda Et = \frac{\Delta(R_n - G)\rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta\gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \tag{8}$$

Dengan

- $R_n$  = radiasi matahari
- $G$  = *soil heat flux*
- $\rho_a$  = densitas rerata udara
- $c_p$  = kalor spesifik udara
- $(e_s - e_a)$  = selisih tekanan uap di udara
- $\Delta$  = *slope* hubungan tekanan uap saturasi dan temperatur
- $\gamma$  = psikometrik konstan
- $r_s$  dan  $r_a$  = *bulk* permukaan dan resistansi aerodinamik

*Run off* merupakan besaran yang menyatakan banyaknya air yang mengalir di permukaan tanah dan tidak meresap ke dalam tanah. *Run off* juga

disebut sebagai air limpasan yang dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$Ro = \frac{1,511xP^{1,44}}{Tm^{1,34}xL^{0,0613}} \quad (9)$$

Dengan  $T_m$  adalah temperatur rerata di daerah resapan ( $^{\circ}C$ ) dan  $L$  adalah luas daerah resapan ( $km^2$ ). Kesenjangan antara *discharge* dan *recharge* dalam sistem hidrologi menjadi faktor utama yang perlu diperhatikan dalam eksploitasi air tanah.

#### 4. Pelaksanaan Penelitian

*Pengambilan Sampel Airtanah.* Sampel airtanah diambil dari mataair Umbul Cokro dan sumur-sumur di daerah yang diduga sebagai daerah tangkapan air (*water recharge area hypothetic*) yang terletak di dataran yang lebih tinggi dari mataair tersebut; diantaranya Wajong Wetan, Kemiri, Karang Podang, Sodong, dan Karang Kendal. Pengambilan sampel airtanah dilakukan antara 30 Mei hingga 15 Juni 2010 saat keadaan cuaca cerah, lebih kurang 2 hari setelah terjadinya hujan, untuk menghindari kontaminasi air hujan yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran kandungan isotop alamnya. Pengambilan sampel airtanah untuk mataair dilakukan secara langsung di mataairnya, sedangkan untuk sumur-sumur di daerah yang diduga daerah tangkapan air dilakukan dengan cara menimba air dari dalam sumur tersebut (sumur dangkal) atau dari kran yang airnya berasal dari dalam sumur tersebut (sumur dalam/sumur bor).

**Tabel 1.** Koordinat lokasi pengambilan sampel airtanah (dengan GPS merk Garmin<sup>®</sup>).

Mataair/ Sumur	Garis Lintang (Selatan)	Garis Bujur (Timur)	Elevasi (m, dpl.)
Umbul Cokro	7°36'12,7'' S	110°38'36,7'' E	216
Wajong Wetan	7°35'34,8'' S	110°36'11,9'' E	344
Kemiri	7°35'27,9'' S	110°35'32,4'' E	389
Karang Podang	7°35'04,2'' S	110°33'31,8'' E	525
Sodong	7°34'17,9'' S	110°33'17,1'' E	584
Karang Kendal	7°34'25,1'' S	110°32'27,3'' E	657

Tabel 1. menunjukkan koordinat lokasi pengambilan sampel airtanah (menggunakan GPS dengan merk Garmin<sup>®</sup>) dalam satuan derajat, menit, sekon, yang kemudian dikonversi ke dalam *Universal Transverse Mercator* (UTM).

**Tabel 2.** Koordinat lokasi pengambilan sampel airtanah (dalam UTM).

Mataair/ Sumur	Koord-X (meter)	Koord-Y (meter)	Koord-Z (meter, dpl.)
Umbul Cokro	460.680	9.159.516	216
Wajong Wetan	456.242	9.160.676	344
Kemiri	455.031	9.160.887	389
Karang Podang	451.335	9.161.611	525
Sodong	450.883	9.163.032	584
Karang Kendal	449.358	9.162.810	657

Pengambilan sampel airtanah untuk setiap lokasi dilakukan menggunakan 2 buah botol sampel masing-masing memiliki volume 1 liter (untuk analisis karbon-13) serta 30 ml (untuk analisis deuterium dan oksigen-18). Botol-botol tersebut kemudian diisi airtanah hingga penuh (tidak terdapat lagi gelembung udara di dalam botol sampel) dan selanjutnya ditutup rapat untuk menghindari masuknya udara luar ke dalam botol sampel.

Preparasi dan analisis  $^{13}C$  dilakukan di Laboratorium Kebumihan dan Geologi, Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi (PATIR), BATAN, Jakarta, dengan menggunakan spektrometer massa, dimana sebelum dilakukan pengukuran terlebih dahulu dilakukan preparasi sampel agar didapatkan serbuk  $CO_3$ .

Preparasi dan analisis deuterium dan oksigen-18 menggunakan *Liquid-Water Stable Isotope Analyzer* atau penganalisis isotop stabil pada air. Alat yang digunakan untuk analisis tersebut adalah LGR DLT-100 yang merupakan pengembangan *Los Gatos Research*. LGR DLT-100 tersebut hanya memerlukan 1 ml air untuk setiap sampel airtanah, dimana 1 mL air dari masing-masing sampel diteteskan ke dalam vial-vial yang selanjutnya disusun sedemikian sesuai prosedur penyusunan vial-vial pada buku panduan. Kemudian vial-vial tersebut diletakkan di sistem *auto sampler*. Secara otomatis, vial-vial tersebut akan diinjeksikan dengan laser, kemudian dianalisis, dan hasil analisis tersebut kemudian ditampilkan pada layar komputer yang terkoneksi dengan LGR DLT-100.

#### 5. Hasil dan Pembahasan

*Penentuan Arah Aliran.* Penentuan arah aliran airtanah berdasarkan sifat alami air yang

mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke yang lebih rendah karena adanya gaya gravitasi. Tabel 2. menunjukkan tinggi muka airtanah berdasarkan kedalaman sumur dan elevasi lokasi sampel terhadap tinggi muka air laut. Asumsi, jika kedalaman sumur diukur dari muka airtanahnya, maka tinggi muka airtanah merupakan selisih dari ketinggian lokasi tersebut terhadap tinggi muka air laut dan kedalaman sumur.

**Tabel 3.** Tinggi muka airtanah di lokasi pengambilan sampel.

Mataair/Sumur	Elevasi (meter, dpl)	Kedalaman Sumur (meter)	Tinggi Muka Airtanah (meter)
Umbul Cokro	216	0	216
Wajong Wetan	344	13	331
Kemiri	389	18	371
Karang Podang	525	36	489
Sodong	584	104	480
Karang Kendal	657	60	597

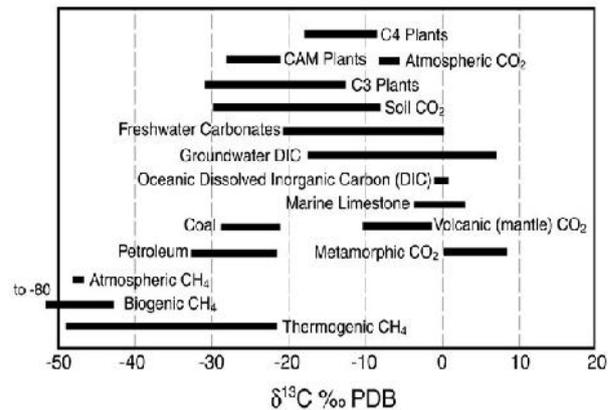
Berdasarkan Tabel 3, airtanah yang memiliki muka airtanah yang tinggi sementara dapat disimpulkan mengalir ke daerah yang memiliki muka airtanah yang lebih rendah. Verifikasi kesimpulan sementara tersebut dilakukan dengan menguji apakah airtanah melalui media yang sama, dengan analisis komposisi  $\delta^{13}\text{C}$  relative terhadap standar *Pee Dee Belemnite* (PDB) atau  $\delta^{13}\text{C}^{\text{‰}}$  terhadap PDB.

Berdasarkan Gambar 4. Nampak bahwa sampel airtanah yang diambil dari mataair dan sumur-sumur nilainya adalah dalam rentang  $-12,92 \pm 4,20$  hingga  $5,56 \pm 4,31^{\text{‰}}$  PDB, dan nilai tersebut masuk dalam *Ground water Dissolved Inorganic Carbon* (DIC), dengan rentang rasio antara  $-18$  hingga  $8^{\text{‰}}$  PDB. Untuk lebih memastikan, hasil tersebut diuji lagi dengan melihat genesis sampel agar diketahui sumur mana yang airnya benar-benar mengalir menuju mataair.

*Penentuan Genesis.* Genesis airtanah ditentukan dengan cara menentukan kadar  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  masing-masing sampel airtanah dengan menggunakan LGR DLT-100. Menghitung  $\delta^2\text{H}$  dan  $\delta^{18}\text{O}$  dengan menggunakan Persamaan (2) dan (3), serta dibandingkan dengan komposisi air laut. Untuk maksud tersebut, telah disepakati secara internasional *Standard Mean Ocean Water* (SMOW).

**Tabel 4.** Hasil analisis komposisi karbon-13 dengan spektrometer massa SIRA-9.

Mataair/Sumur	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ terhadap PDB)
Umbul Cokro	$-10,66 \pm 1,82$
Wajong Wetan	$-7,48 \pm 1,81$
Kemiri	$-12,92 \pm 4,20$
Karang Podang	$-6,28 \pm 2,04$
Sodong	$5,56 \pm 4,31$
Karang Kendal	$0,57 \pm 3,93$



**Gambar 4.** Grafik asal-usul kandungan karbon-13 berdasarkan rasio perbandingan konsentrasinya (standar PDB).

Tabel 5. dan Tabel 6. menunjukkan hasil analisis deuterium dan oksigen-18 dengan menggunakan LGR DLT-100.

Komposisi  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  masing-masing sampel airtanah berada di sekitar garis meteorik lokal. Jika kemudian ditarik garis linier untuk sampel airtanah tersebut memiliki *slope* kurang dari 8, yaitu 3,7784. Hal tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi fraksinasi isotop sehingga terjadi perubahan komposisi molekul isotop ringan dan

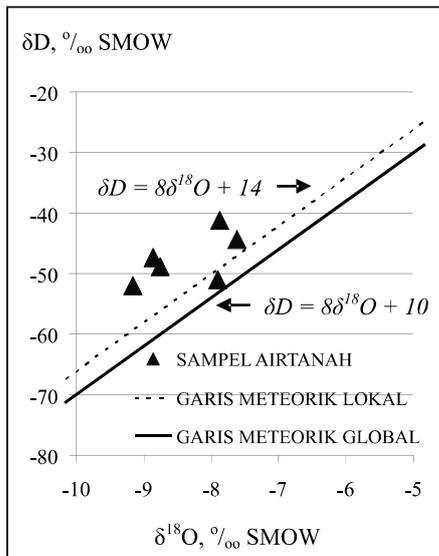
**Tabel 5.** Hasil analisis deuterium dengan menggunakan LGR DLT-100.

Sampel	Average Means	Actual	‰ SMOW	
	D/H	D/H	δD	σ,δD
Standar 1	1.44E-04	1.43E-04	-79.00	
Standar 2	1.49E-04	1.49E-04	-43.60	
Standar 3	1.54E-04	1.54E-04	-9.80	
Umbul Cokro	1.48E-04	1.48E-04	-52.00	0.77
Wajong Wetan	1.49E-04	1.49E-04	-44.39	0.39
Kemiri	1.49E-04	1.49E-04	-41.26	0.70
Karang Podang	1.48E-04	1.48E-04	-48.76	0.51
Sodong	1.48E-04	1.48E-04	-51.01	2.42
Karang Kendal	1.48E-04	1.48E-04	-47.28	0.71

**Tabel 6.** Hasil analisis oksigen-18 dengan menggunakan LGR DLT-100

Sampel	Average Meas	Actual	% <sub>∞</sub> SMOW	
	<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O	<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O	δ18O	σ, δ <sup>18</sup> O
Standar 1	1.99E-03	1.98E-03	-11.54	
Standar 2	2.00E-03	1.99E-03	-7.14	
Standar 3	2.01E-03	2.00E-03	-2.96	
Umbul Cokro	2.00E-03	1.99E-03	-9.16	0.28
Wajong Wetan	2.00E-03	1.99E-03	-7.62	0.19
Kemiri	2.00E-03	1.99E-03	-7.87	0.17
Karang Podang	2.00E-03	1.99E-03	-8.76	0.15
Sodong	2.00E-03	1.99E-03	-7.90	0.32
Karang Kendal	2.00E-03	1.99E-03	-8.87	0.22

isotop berat, yang diakibatkan adanya difusitas dari <sup>1</sup>H<sup>2</sup>H<sup>16</sup>O yang lebih besar dari H<sub>2</sub><sup>18</sup>O. Harga slope kurang dari 8 juga menunjukkan bahwa kelembaban (*humidity*) di daerah imbuh relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan GMWL.



**Gambar 5.** Grafik komposisi deuterium versus oksigen-18 relatif terhadap SMOW.

**Tabel 7.** Rentang harga kandungan deuterium (‰ SMOW).

Mataair/Sumur	δD min	δD max
<b>Umbul Cokro</b>	<b>-52.78</b>	<b>-51.23</b>
Wetan	-44.79	-44.00
Kemiri	-41.97	-40.56
Karangpodang	-49.27	-48.25
<b>Sodong</b>	<b>-53.43</b>	<b>-48.59</b>
Karangkendal	-48.00	-46.57

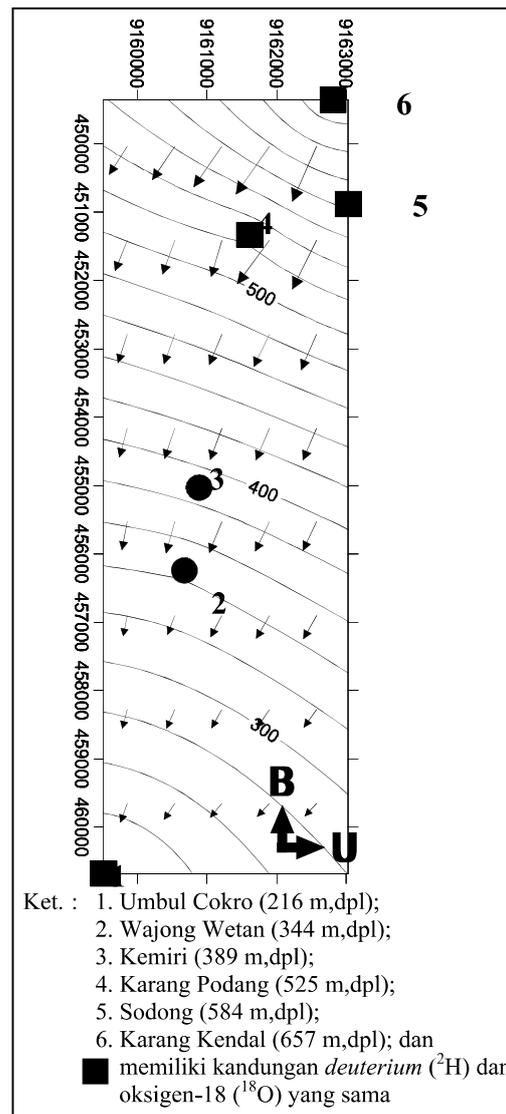
Ket. : ■ memiliki rentang yang sama

**Tabel 8.** Rentang harga kandungan oksigen-18 (‰ SMOW)

Mataair/Sumur	δ <sup>18</sup> O min	δ <sup>18</sup> O max
<b>Umbul Cokro</b>	<b>-9.44</b>	<b>-8.89</b>
Wetan	-7.81	-7.43
Kemiri	-8.04	-7.70
<b>Karangpodang</b>	<b>-8.91</b>	<b>-8.60</b>
Sodong	-8.22	-7.59
<b>Karangkendal</b>	<b>-9.09</b>	<b>-8.65</b>

Ket. : ■ memiliki rentang yang sama

Berdasarkan Gambar 5., Tabel 7., dan Tabel 8., menunjukkan bahwa airtanah yang diambil di Sodong memiliki genesis <sup>2</sup>H yang sama dengan mataair, sedangkan airtanah yang diambil di Karang Podang dan Karang Kendal memiliki genesis <sup>18</sup>O yang sama dengan mataair.



Ket. : 1. Umbul Cokro (216 m,dpl);  
 2. Wajong Wetan (344 m,dpl);  
 3. Kemiri (389 m,dpl);  
 4. Karang Podang (525 m,dpl);  
 5. Sodong (584 m,dpl);  
 6. Karang Kendal (657 m,dpl); dan  
 ■ memiliki kandungan deuterium (<sup>2</sup>H) dan oksigen-18 (<sup>18</sup>O) yang sama

**Gambar 6.** Peta kontur lokasi pengambilan sampel airtanah.

Deuterium  $^{18}\text{O}$  merupakan isotop-isotop yang saling terkait di dalam airtanah. Penentuan daerah imbuhan tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan kandungan salah satu isotopnya saja, karena genesis airtanah ditentukan berdasarkan komposisi isotop penyusunnya, dalam hal ini  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$ . Harga negatif  $\delta$  dari sampel menunjukkan bahwa komposisi isotop sampel lebih kecil dari standar. Fenomena ini menunjukkan bahwa setelah terjadi hujan di daerah imbuhan kemudian secara alamiah mengalami proses evaporasi serta fraksinasi isotop (air ringan dan air berat). Sodong, Karang Podang, dan Karang Kendal, dalam hal ini merupakan daerah imbuhan Umbul Cokro mengalami proses evaporasi dan fraksinasi isotop dalam pengaruh angin, kelembaban udara, dan temperatur yang sama dengan airtanah yang diambil di mataair. Proses-proses alamiah seperti tersebut hanya mungkin terjadi di lingkungan yang dipengaruhi karakteristik cuaca/iklim yang sama. Dengan demikian, dapat dipastikan bahwa airtanah yang diambil di Sodong, Karang Podang, Karang Kendal dan di mataair berada dalam pengaruh lingkungan yang sama. Berdasarkan hasil analisis tersebut, daerah imbuhan Umbul Cokro berasal dari daerah Sodong, Karang Podang dan Karang Kendal.

Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian dengan teori, dimana *run off* (Ro) lebih besar dari *recharge* (Rch), karena daerah imbuhan terletak di lereng Gunung Merapi yang memiliki komposisi litologi batuan endapan vulkanik muda, terdiri dari tufa, lahar, breksi, dan lava andesit sampai basal, dengan kelulusan tinggi hingga sedang, berkelulusan tinggi terutama pada endapan lahar dan aliran lava vesikuler. Oleh karena itu, daerah dengan elevasi di atas Karang Kendal (>657 m, dpl) tidak ditemukan lagi sumur, baik sumur dangkal maupun sumur dalam/bor, karena berdasarkan litologi batuanannya, yang keras dan sulit dilakukan penggalian, sehingga limpasan air hujannya lebih besar bila dibandingkan dengan air hujan yang mengalami infiltrasi atau *recharge* ke dalam tanah.

## 6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Daerah imbuhan Umbul Cokro berasal dari daerah Sodong, Karang Podang, dan Karang Kendal, dibuktikan dengan pembuktian genesis, dimana komposisi isotop penyusun molekul airtanah di dalam sumur di daerah tersebut sama dengan di mataair; dan
2. Arah aliran airtanah berasal dari Sodong, Karang Podang, dan Karang Kendal yang terletak di lereng Gunung Merapi, dan terus bergerak ke arah tenggara menuju mataair Umbul Cokro.

## Daftar Pustaka

- A. Djaeni. *Peta Hidrogeologi Indonesia, Lembar Yogyakarta, 1 : 250.000*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Alip, Zainal Abidin dan Djiono. 1990. “Oksigen-18 dan Deuterium di Dalam Air Hujan Pada Elevasi yang Berbeda”. Laporan Penelitian, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta,
- Data Klimatologi Boyolali*. 2010. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jawa Tengah, Stasiun Klimatologi, Semarang
- Data Radiasi Matahari Yogyakarta*. 2008. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Daerah Istimewa Yogyakarta, Stasiun Pengasih, Kulon Progo.
- Djiono, Zainal Abidin, Indrojono, Paston S. dan Darman. 1988. “Deuterium dan Oksigen-18 di Dalam Air Hujan”. Laporan Penelitian, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta,.
- Eva Ristin Pujiindiyati. 2007 “Tritium Untuk Identifikasi dan Penanggalan Air Tanah Modern”. *Journal of Waste Management Technology*, 10:68–75,.
- Evans, J.E., Joki, E.G., and Smith R.R. 1955. “Evidence for a Second Naturally Occuring Isotopes”. *Phillips Petroleum Company, Atomic Energy Division*, Idaho,.
- Heru Hendrayana, Agus Budhie Wijatna, dan Aris Sunantyo. 1996. “Penentuan Pola Aliran Airtanah Menggunakan Isotop Alam”. Laporan Penelitian, Riset Unggulan Terpadu (RUT), Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta,.
- Indrojono, Syafalni, Zainal Abidin, Alip, Djiono dan Agus Martinus. *Studi Airtanah Semarang Menggunakan Isotop Alam*. Laporan Peneli-

- tian, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta.
- Kruseman, G.P. and De Ridder, N.A. 1991. "Analysis and Evaluation of Pumping Test Data", 2nd Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Bull 11, Gweningen,
- Laporan Akhir Studi Mata Air Sigedang. 2008. Final Report, Kerjasama FT. Geologi UGM dengan PT. Tirta Investama (Danone Indonesia), unpublished.
- Penelitian Potensi Sumber Mata Air Kebon Candi (Gondang Wetan) Pasuruan Dengan Metode Isotop Alam. 2005. Final Report, Kerjasama FT. Geologi UGM dengan PT. Tirta Investama (Danone Indonesia), unpublished.
- Syafalni, M. Sri Saeni, Satrio dan Djiono. 2001. "Penyelidikan Daerah Imbuh Airtanah Bekasi Dengan Teknik Hidroisotop". *Risalah Perte-*
- muan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 33–41,.
- Suharyadi. *Diktat Kuliah Geohidrologi*. 1984. Diktat, Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, unpublished,.
- Syafalni, Wandowo, Indrojono, Alip dan Agus Martinus. 2001. *Penentuan Umur Airtanah Dengan Penanggalan Radio Karbon <sup>14</sup>C*. Laporan Penelitian, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jakarta.
- Zainal Abidin, Hudi Hastowo dan Aang Hanafiah. 2007. "Teknologi Isotop Alam Untuk Manajemen Eksplorasi dan Eksploitasi Airtanah". *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 3:1–9,.
- Todd, D.K. 1980. *Groundwater Hydrology*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York,.