

Studi Daerah Imbuh Sistem Air Sungai Bawah Tanah Gunungkidul–Yogyakarta Menggunakan Isotop Stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$

Recharge Area Study of Underground River Water System in Gunungkidul–Yogyakarta Using Stable Isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$

Satrio dan Paston Sidauruk

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440
E-mail: satrio@batan.go.id

Diterima 29-07-2015; Diterima dengan revisi 12-08-2015; Disetujui 08-09-2015

ABSTRAK

Studi Daerah Imbuh Sistem Air Sungai Bawah Tanah Gunungkidul–Yogyakarta Menggunakan Isotop Stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Penelitian air tanah di daerah Gunungkidul, Yogyakarta telah dilakukan menggunakan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Secara geologi daerah penelitian berada di daerah karst yang didominasi oleh batu gamping (*limestone*) berupa batuan karbonat dalam bentuk senyawa CaCO_3 . Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan sebanyak lima alat curah hujan di lima lokasi dengan elevasi yang berbeda-beda. Sejumlah sampel air sungai bawah tanah, mata air dan air permukaan diambil untuk dianalisis konsentrasi isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Penelitian ini bertujuan mengetahui daerah resapan atau daerah imbuh (*recharge area*) system air sungai bawah tanah di daerah Gunungkidul melalui pendekatan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. Diharapkan penelitian ini dapat berperan dalam membantu kelestarian air tanah di daerah Gunungkidul secara berkelanjutan. Berdasarkan hasil analisis isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ air hujan diperoleh persamaan garis meteorik lokal untuk daerah Gunungkidul dengan persamaan: $\delta^2\text{H} = 7,978 \delta^{18}\text{O} + 8,423$ yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian air tanah selanjutnya di daerah Gunungkidul dan sekitarnya. Sedangkan dari hasil analisis kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ diperoleh data bahwa elevasi daerah imbuh system air sungai bawah tanah daerah Gunungkidul berkisar antara 200 – 500 m di atas permukaan laut dengan perkiraan daerah imbuh di zone Baturagung yang merupakan daerah pegunungan dengan batuan induk vulkanik dan sedimen tufan serta memiliki elevasi antara 200 – 700 m di atas permukaan laut.

Kata Kunci : Gunungkidul, daerah imbuh, isotop stabil, daerah karst, sungai bawah tanah

ABSTRACT

Recharge Area Study of Underground River Water System in Gunungkidul–Yogyakarta Using Stable Isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. Groundwater study for determining the recharge area of underground river system in the area of Gunungkidul, Yogyakarta has been conducted using stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. Geologically, the study area is karst area which dominated by limestone of carbonate rocks in the form of CaCO_3 compounds. This research was conducted by placing five rainfalls gauge in five locations with different elevations. A number of samples of underground water river, springs and surface water from studied areas were taken for assaying the concentrations of stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$. It is expected that this study can give valuable contribution for sustainable preservation of groundwater in Gunungkidul. Based on the analysis of stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of rain water were obtained that local meteoric line equation for the area of Gunung by the equation: $\delta^2\text{H} = 7.978 \delta^{18}\text{O} + 8.423$ as reference for further research in Gunungkidul area. More over, the result of the analysis of content of stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ data showed that the recharge area for underground river system of Gunungkidul area is at elevation of 200 – 500

m above sea level with estimated recharge area is in zone of Baturagung, a mountainous region with volcanic and tuffaceous sedimentary rocks at elevation of 200 – 700 m above sea level.

Key words : Gunungkidul, recharge area, stable isotope, karst area, underground river

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu kebutuhan pokok bagi manusia, baik untuk kebutuhan air minum maupun untuk berbagai keperluan lainnya. Kebutuhan terhadap air semakin lama semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri [1,2]. Karena kondisi geologi, tidak semua daerah memiliki ketersediaan air yang cukup untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di sekitarnya, seperti yang terjadi di daerah Gunungkidul yang umumnya didominasi oleh batuan gamping [3]. Untuk memenuhi kebutuhan air, penduduk biasanya banyak memanfaatkan air yang berasal dari mata air yang muncul di beberapa lokasi. Mata air di daerah *karst* umumnya memiliki debit yang cukup besar dan fenomena ini menarik para peneliti air tanah, terutama di daerah kering dalam menghadapi kelangkaan air [4].

Wilayah Gunungkidul merupakan wilayah *karst* yang dapat dikatakan identik dengan kekeringan dengan bentang alamnya berupa pegunungan kapur dan dibawahnya banyak dialiri sungai bawah tanah [5]. Daerah ini memiliki tipologi *karst* topografi, yaitu bentukan bentang alam khas pada batuan karbonat (gamping) akibat proses tektonik yang dilanjutkan dengan adanya pelarutan dan terbentuk celah tempat air mengalir. Sumber air yang berada di dalam tanah yang berupa gua-gua atau sungai-sungai bawah tanah merupakan tantangan yang harus dihadapi dalam penyediaan air [6].

Sistem hidrologi kawasan *karst* yang unik sangat dipengaruhi oleh porositas sekunder (aliran air tanah melalui celah-celah pelarutan) yang menyebabkan air masuk ke dalam sistem aliran bawah tanah

dan menyebabkan kondisi kering di permukaan tanah. Sungai permukaan di kawasan *karst* sangat minim, tetapi sistem sungai bawah permukaan berkembang dengan baik yang dikenal dengan sungai bawah tanah [7]. Akuifer *karst* memiliki kerentanan terhadap berkurangnya ketersediaan air tanah secara cepat, disebabkan oleh musim berkepanjangan dan berkurangnya area resapan air di sekitarnya sehingga diperlukan upaya perlindungan daerah resapan air (*recharge area*).

Dengan latar belakang seperti disebutkan di atas, penelitian bertujuan menentukan daerah imbuhan atau daerah resapan air tanah untuk wilayah Gunungkidul dan sekitarnya menggunakan pendekatan teknik isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ yang merupakan *tracer* isotop alam dalam penelitian hidrologi. Aplikasi *tracer* isotop alam memberikan pemahaman dalam studi hidrologi secara praktis dan berguna dalam membantu konseptualisasi sistem hidrologi, baik lokal maupun regional [8]. Isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ merupakan komponen molekul air dan berfungsi sebagai perunut yang efektif dalam mengidentifikasi sumber dan evolusi air dalam lapisan tanah. Penelitian ini dilakukan dengan menempatkan sejumlah alat curah hujan di beberapa lokasi dengan elevasi yang berbeda-beda. Pengukuran curah hujan dan kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ diamati setiap bulannya dalam jangka satu tahun. Sampel-sampel air yang berasal dari sejumlah air sungai bawah tanah dan mata air juga diambil untuk dianalisis kandungan dari kedua isotop tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna untuk kelangsungan ketersediaan air secara berkelanjutan.

TOPOGRAFI DAN GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Kabupaten Gunungkidul merupakan salah satu dari lima kabupaten di Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang terletak sekitar 40 km di ujung tenggara kota Yogyakarta. Kabupaten Gunungkidul merupakan dataran tinggi dan bergunung-gunung. Berdasarkan topografi keadaan tanahnya secara garis besar dibagi menjadi 3 wilayah pengembangan atau zone [9,10], yaitu:

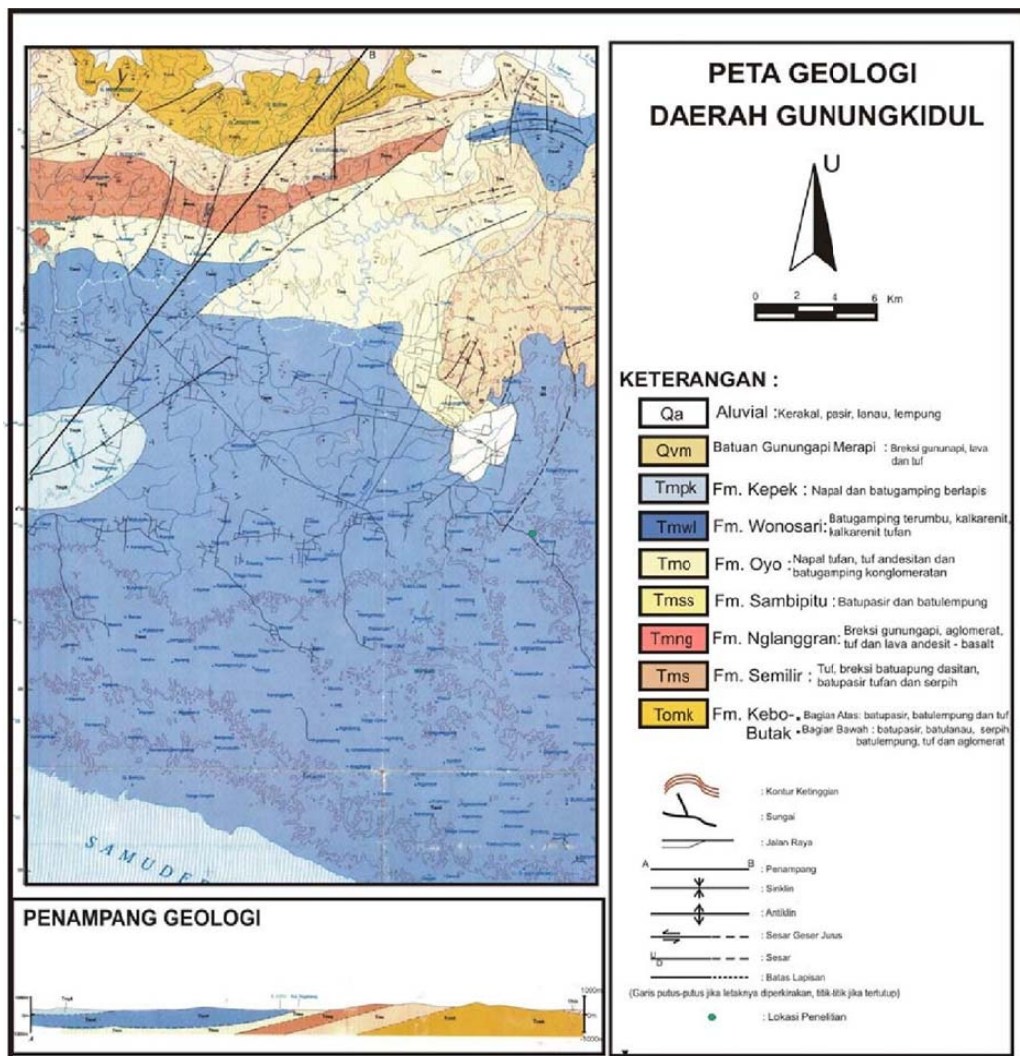
1. Zone utara (zone Baturagung)

Zone Baturagung berada pada ketinggian 200 - 700 m diatas permukaan laut.

Wilayah ini berpotensi sebagai obyek Ekowisata hutan dan alam pegunungan. Sumber air tanah terdapat dengan kedalaman 6 - 12 m dari permukaan tanah. Jenis tanah didominasi litosol dengan batuan induk vulkanik dan sedimen taufan. Wilayah ini meliputi: Kecamatan Patuk, Nglipar, Gedangsari, Ngawen, Semin dan Ponjong bagian Utara.

2. Zone tengah (zone Ledoksari)

Zone Ledoksari berada pada ketinggian 150 - 200 diatas permukaan laut. Jenis tanah didominasi oleh asosiasi mediteran merah dan grumosol hitam dengan bahan induk batu kapur. Pada musim kemarau,



Gambar 1. Peta geologi daerah Gunungkidul [12]

partikel-partikel air masih mampu bertahan dalam induk batu kapur tersebut. Sungai di atas tanah, pada musim kemarau kering. Kedalaman air tanah berkisar antara 60 - 120 m di bawah permukaan tanah. Wilayah ini meliputi: Kecamatan Playen, Wonosari, Karangmojo, Semanu bagian selatan dan Ponjong bagian Tengah.

3. Zone selatan (zone Pegunungan Seribu)
 Zone Pegunungan Seribu berada pada ketinggian 0 - 300 m diatas permukaan laut. Batuan dasar pembentuknya adalah batu kapur dengan ciri khas bukit-bukit kerucut (*conical limestone*) dan merupakan kawasan *karst*. Pada wilayah ini banyak dijumpai sungai bawah tanah. Wilayah ini meliputi: Kecamatan Tepus, Tanjungsari, Panggang, Purwosari, Paliyan, Saptosari, Girisubo, Rongkop, Semanu bagian selatan dan Ponjong bagian Selatan.

Kondisi geologi kabupaten Gunungkidul dipengaruhi oleh keberadaan dari kars dari pegunungan seribu. Menurut Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Gunungkidul, kira-kira 74% dari daerah yang berasal dari pembentukan batu gamping [11]. Di sebelah barat berbatasan dengan kabupaten Bantul, ada zone lipatan dan zone patahan) yang juga secara fisik merupakan rintangan terhadap akses ke Kabupaten Gunungkidul. Di zone utara (sepanjang pegunungan Baturagung

Mountain), secara geologi merupakan rangkaian pembentukan pegunungan andesit (Gunungwungkal, Wuni, Semilir, Nglangran dan Mandalika). Berdasarkan peta geologi (Gambar 1), kondisi batuan di Kabupaten Gunungkidul dapat dibedakan atas: Formasi Kepek (Tm_{pk}), Formasi Wonosari - Punung (Tm_{wl}), Formasi Oyo (Tm_o), Formasi Sambipitu (Tm_s), Formasi Nglanggran (Tm_{ng}), dan Formasi Kebo Butak (Tm_{kb}).

METODE PENELITIAN DAN ANALISIS

Metode pengambilan sampel

Dalam penelitian ini sejumlah sampel berupa air hujan, air sungai, air sumur dan mata air diambil dari beberapa lokasi. Prosedur pengambilan sampel air hujan dilakukan dengan menempatkan sebanyak lima unit alat penampung air hujan di lima lokasi pada elevasi yang berbeda-beda dari rendah ke tinggi. Untuk mencegah evaporasi, sekitar 250 ml minyak parafin dituangkan kedalam alat penampung air hujan tersebut [13,14]. Sampel air hujan diambil sebanyak 20 ml dan diambil secara berkala setiap bulan dalam jangka waktu satu tahun. Sampel-sampel yang berasal dari mata air, sumur bor, air keluaran dan sumber air permukaan diambil di beberapa lokasi sekitar Gunungkidul. Seperti halnya dengan pengambilan air hujan, sampel-sampel tersebut diambil sebanyak 20 ml dan

Tabel 1. Lokasi dan elevasi penangkap curah hujan

Nama Stasiun	Lokasi	Ketinggian (m)
CH Baron	SMK Pelayaran, Baron	90
CH Seropan	Dusun Ketonggo, Desa Gombang, Kec. Ponjong, Gunungkidul	205
CH Pelataran	Desa Pelataran, Kec. Ponjong, Gunungkidul	273
CH Gedong	Dusun Gedong, Desa Pesawahan, Kec. Ponjong, Gunungkidul	385
CH Tambak Romo	Desa Tambak Romo, Kec. Ponjong, Gunungkidul	498

Ket. CH : Curah Hujan

dimasukan kedalam botol plastik berkapasitas 20 ml. Untuk menghindarkan interaksi dengan atmosfer dan penguapan, botol plastik dilengkapi dengan penutup bagian dalam. Sampel-sampel air yang telah dikumpulkan kemudian dibawa ke laboratorium Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi - BATAN untuk dilakukan analisis kandungan isotop alamnya. Pengambilan sampel perlu dilakukan beberapa kali untuk melihat konsistensi kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ sebagai fungsi waktu. Khusus untuk air hujan, pengambilan sampel dilakukan setiap bulannya paling tidak selama 1 tahun. Dalam penelitian ini, 5 penangkap curah hujan (CH) telah dipasang pada lima lokasi yang berbeda dengan ketinggian yang berbeda. Lokasi dan elevasi kelima penangkap curah hujan diberikan dalam Tabel 1.

Metode analisis

Molekul air di alam terbentuk dari isotop hidrogen (^1H , ^2H , ^3H) dengan isotop Oksigen (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O). Dari isotop-isotop tersebut, tiga molekul air yang mempunyai kelimpahan terbesar adalah: H_2^{16}O , H_2^{18}O , dan HD^{16}O [15]. Karena kelimpahan molekul-molekul H_2^{18}O dan HD^{16}O dibandingkan dengan kelimpahan H_2^{16}O adalah relatif sangat kecil, maka kelimpahan yang diukur biasanya adalah kelimpahan relatif terhadap suatu air standar internasional SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) seperti dalam persamaan berikut [16, 17].

$$\delta D = \frac{RHDO_{\text{sampel}} - RHDO_{\text{SMOW}}}{RHDO_{\text{SMOW}}} \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{RH_2^{18}\text{O}_{\text{sampel}} - RH_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}}{RH_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}} \quad (2)$$

dimana:

$R HDO_{\text{sampel}}$, $R H_2^{18}\text{O}_{\text{sampel}}$: Kelimpahan molekul HDO, H_2^{18}O dari sampel

$R HDO_{\text{SMOW}}$, $R H_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$: Kelimpahan molekul HDO, H_2^{18}O dari standar SMOW

$\delta D = \delta^2\text{H}$: Kelimpahan ^2H sampel (Kelimpahan relatif molekul HD^{16}O , satuan: ‰)

$\delta^{18}\text{O}$: Kelimpahan ^{18}O sampel (Kelimpahan relatif molekul H_2^{18}O , satuan: ‰)

Keuntungan dari penggunaan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dibandingkan dengan *tracer* isotop lainnya yaitu kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ air hujan menunjukkan hubungan linier antara isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ berupa garis meteorik global (*global meteoric water line*). Air hujan atau air meteorik cenderung memiliki kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ yang lebih miskin (*depleted*) pada daerah *latitude* yang lebih tinggi [18]. Fenomena ini juga terjadi saat kedua isotop stabil tersebut bergerak jauh ke dalam daratan. Dengan alasan ini, hasil plot kedua isotop menghasilkan kemiringan yang sedikit berbeda dan dikenal dengan garis meteorik lokal (*local meteoric water line*) [19].

Alat dan bahan

- Spektrometer massa model SIRA-9
- Isoprep-18 (Piranti preparasi sampel air untuk $\delta^{18}\text{O}$)
- Perangkat pendingin ($\sim -90^\circ\text{C}$)
- Tabung sampel (vial glass) 20 ml
- N_2 -cair, Gas standar CO_2 .

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

$\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dianalisis dengan menggunakan alat spektrometer massa model SIRA-9, VG Isogas. Analisis $\delta^{18}\text{O}$ dilakukan dengan cara mereaksikan 2 ml sampel air dengan gas CO_2 dalam botol gelas dan disetimbangkan pada suhu 30°C selama 8 jam dalam alat preparasi sampel Isoprep-18. Selanjutnya gas CO_2 dialirkan kedalam spektrometer massa untuk penentuan kandungan isotop stabilnya.

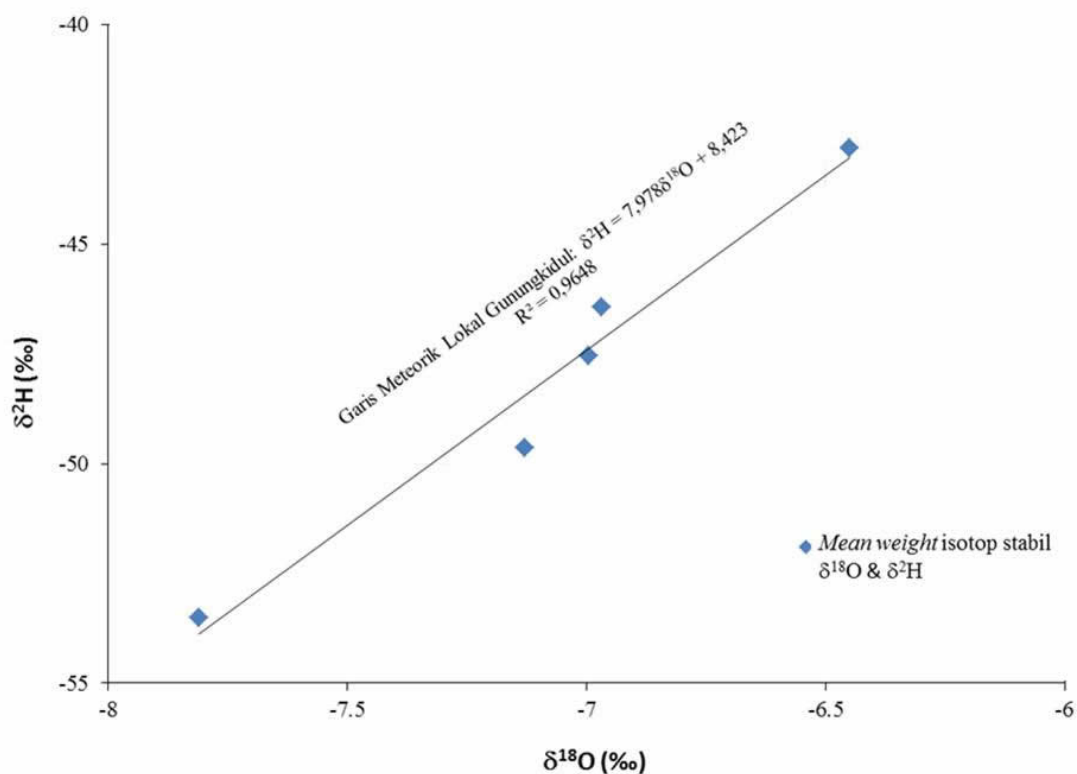
Pengukuran kandungan $\delta^2\text{H}$ dilakukan dengan mereaksikan 10 μl sampel air dengan 300 mg Zn aktif dalam kondisi vakum dan dipanaskan pada suhu 450°C selama 30 menit sampai gas H_2 terbentuk dengan O tereduksi menjadi ZnO yang

seterusnya gas H_2 dialirkan kedalam spektrometer massa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah imbuah sistem sungai bawah tanah ditentukan dengan mengumpulkan sampel air secara berkala dari berbagai sumber air yang terdapat dalam daerah

stabil $\delta^{18}O$ dan δ^2H yang disebut dengan persamaan garis air meteorik lokal (*local meteoric water line*). Gambar 3 dan Gambar 4 masing-masing menggambarkan hubungan antara elevasi dengan rerata kandungan isotop stabil dari kelima penangkap curah hujan untuk isotop $\delta^{18}O$ dan isotop δ^2H . Persamaan garis air meteorik, hubungan antara elevasi dengan kandungan isotop stabil baik untuk isotop $\delta^{18}O$ maupun δ^2H



Gambar 2. Grafik hubungan isotop δ^2H vs $\delta^{18}O$ air hujan bulanan daerah Gunungkidul

penelitian seperti air sungai bawah tanah, mata air, air permukaan maupun air hujan [20]. Pengumpulan curah air hujan dilakukan pada lima lokasi yang berbeda dengan elevasi yang berbeda secara signifikan. Lokasi dan elevasi dari kelima alat curah hujan daerah penelitian ditunjukkan melalui Tabel 1. Sedangkan kandungan isotop stabil $\delta^{18}O$ dan δ^2H dari lima penampung curah hujan dapat dilihat pada Tabel 2. Gambar 2 menunjukkan hubungan linier antara kandungan isotop

selanjutnya akan digunakan sebagai referensi untuk menentukan elevasi daerah imbuah sumber air yang diselidiki di daerah penelitian [21]. Kandungan isotop stabil $\delta^{18}O$ dan δ^2H yang berasal dari sumber air sekitar daerah penelitian yang berupa gua sungai bawah tanah, mata air, air keluaran dan air kali dapat dilihat dalam Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa kandungan isotop stabil $\delta^{18}O$ dan δ^2H dari sumber air yang di kumpulkan periode Maret 2011 hingga September 2011 bervariasi -5 ‰

hingga -10 ‰ untuk isotop ^{18}O dan antara -43 ‰ hingga -66 ‰ untuk isotop $\delta^2\text{H}$. Variasi yang cukup signifikan menunjukkan bahwa waktu tinggal (*recidence time*) dari

sumber air tersebut relatif singkat dan hal ini juga mengindikasikan bahwa daerah imbuh tidak terlalu jauh.

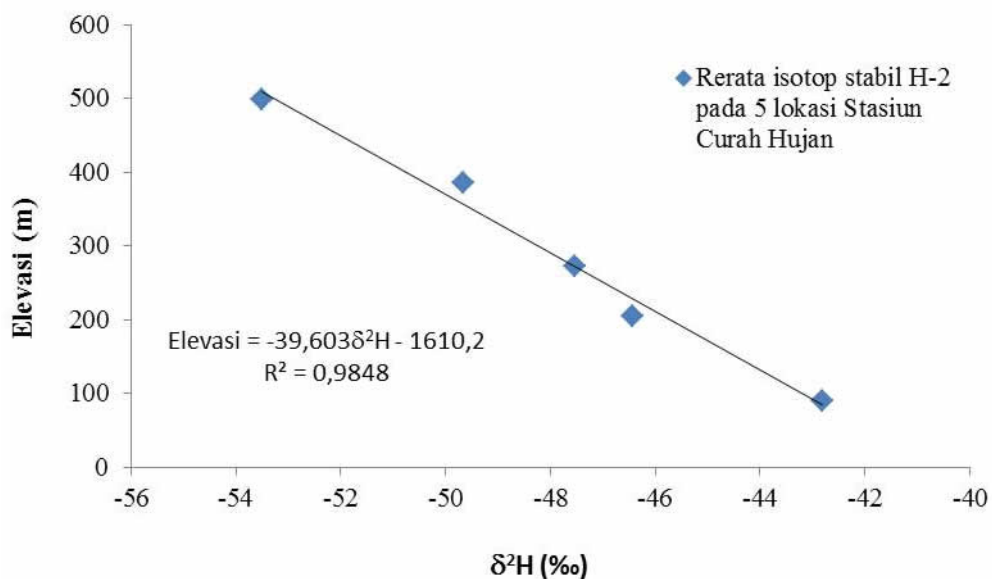
Tabel 2. Data Intensitas dan konsentrasi isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ air hujan bulanan daerah Gunungkidul, Yogyakarta

No.	Bulan	CH Gedong (385m)			CH Plataran (273m)			CH Seropan (205m)			CH Pantai Baron(90m)			CH Tambakromo (498m)		
		I (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	I (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	I (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	I (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	I (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	Agu 2010	92,5	-5,54	-41,1	24,1	-4,76	-35,8	38,5	-8,31	-64	9,6	-5,5	-44,4	-	-	-
2	Sep2010	167,6	-9,65	-72,4	157,0	-6,22	-39,7	60,7	-6,04	-45,5	129,1	-6,76	-48,6	-	-	-
3	Okt 2010	88,6	-4,69	-27,6	92,5	-4,44	-25,9	175,3	-5,3	-33,9	134,9	-3,45	-18,3	-	-	-
4	Nop 2010	125,2	-6,11	-40,5	169,6	-5,94	-39,3	132,9	-5,79	-38,2	98,3	-4,54	-29,4	-	-	-
5	Des 2010	158,0	-6,5	-43,2	163,0	-6,76	-45,1	150,3	-5,58	-36,7	192,7	-6,93	-46,3	-	-	-
6	Jan 2011	282,3	-6,81	-45,4	180,2	-7,42	-49,8	304,4	-7,99	-53,8	308,3	-7,15	-47,8	-	-	-
7	Peb 2011	336,2	-6,34	-44,1	468,2	-5,74	-37,5	154,1	-6,61	-38,2	154,1	-3,16	-16,8	317,9	-7,20	-46,4
8	Mar 2011	131,0	-6,07	-42	242,8	-6,47	-40,9	231,2	-6,62	-38,6	231,2	-7,02	-43,6	150,3	-6,05	-42,0
9	Apr 2011	146,4	-9,18	-66,2	431,6	-8,97	-65,2	192,7	-8,29	-63,7	192,7	-8,9	-64,8	146,7	-9,20	-66,2
10	Mei 2011	159,9	-9,4	-66,8	231,2	-8,79	-63,1	109,8	-9,1	-61,3	73,2	-8,6	-60,1	159,9	-9,40	-66,8

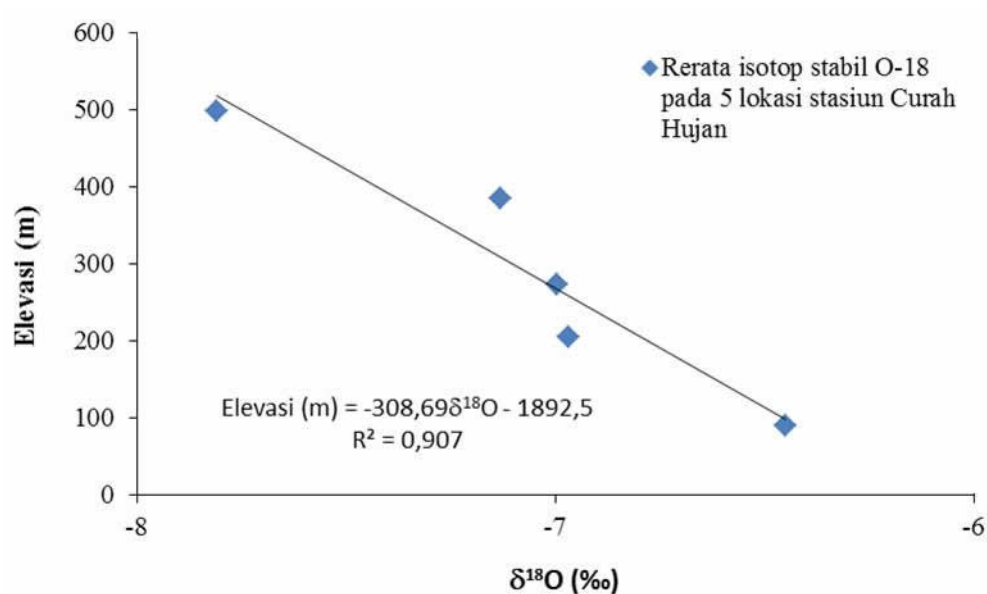
Tabel 3. Data konsentrasi isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ air tanah, mata air dan air sumur daerah Gunungkidul, Yogyakarta

Lokasi Sampling	Bulan Pengambilan Sampel / Kandungan Isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ (‰) SMOW															
	Maret 2010		April 2010		Juni 2010		Okt 2010		Juni 2011		Sep 2011		Okt 2011		Des 2011	
	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
AS Gua Ngobaran	-6,58	-45,4	-6,24	-37,8	-5,16	-37,7	-5,1	-44,1	-5,39	-43,8	-7,93	-51,6	-9,39	-61,7	-	-
AS Goa Ngereneng	-6,53	-46,3	-6,88	-43,6	-6,27	-44,5	-6,93	-46,7	-	-	-	-	-9,93	-65,2	-9,91	-64,7
AS Gua Baron	-8,03	-53,2	-	-	-6,44	-42,8	-5,54	-40,6	-6,47	-43,7	-	-	-9,30	-60,1	-	-
AS Gua Seropan	-7,57	-42,9	-7,15	-42,6	-5,23	-43,7	-6,8	-50,2	-	-	-	-	-9,99	-65,9	-	-
Sumber Ponjong	-6,99	-51,2	-8,06	-51,3	-6,27	-44,5	-5,7	-44,4	-	-	-	-	-9,47	-62,0	-	-
MA Sriti	-	-	-	-	-	-	-	-	-6,40	-42,5	-7,94	-47,3	-9,35	-62,6	-	-
Air Sumur Baron	-6,75	-50,8	-	-	-	-	-	-	-6,57	-43,7	-5,47	-37,4	-9,59	-61,7	-5,87	-39,5
Sundak	-5,32	-50,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-9,58	-60,5	-6,09	-36,9
MA Teleng	-5,28	-48,6	-	-	-	-	-	-	-6,79	-45,3	-6,71	-44,5	-9,68	-66,6	-	-
MA Selonjono	-	-	-	-	-	-	-	-	-6,92	-46,2	-7,43	-47,2	-9,73	-63,8	-3,02	-15,4
MA Beton	-8,18	-44,8	-	-	-	-	-	-	-6,83	-45,6	-	-	-	-	-	-
MA Gedong	-	-	-	-	-	-	-	-	-6,68	-44,5	-6,12	-42,0	-	-	-	-

Ket. AS: Air Sungai
MA: Mata Air



Gambar 3. Grafik hubungan Elevasi vs Konsentrasi isotop δ^2H daerah Gunungkidul



Gambar 4. Grafik hubungan Elevasi vs Konsentrasi isotop $\delta^{18}O$ daerah Gunungkidul

Estimasi elevasi daerah imbuh suatu sumber air diperoleh dengan dua cara, yaitu [22, 23]:

1. Jika kandungan isotop stabil $\delta^{18}O$ dan δ^2H tidak bervariasi secara signifikan sebagai fungsi waktu maka rerata dari kandungan isotop stabil dari sumber air tersebut akan digunakan untuk mencari daerah

imbuhnya dengan mensubstitusi rerata kandungan isotop tersebut kedalam persamaan antara elevasi dan kandungan isotop yang telah diperoleh sebelumnya.

2. Jika kandungan isotop stabil bervariasi secara signifikan, maka persamaan hubungan antara kandungan isotop stabil δ^2H dengan $\delta^{18}O$ perlu dicari. Selanjutnya,

perpotongan antara persamaan ini dengan persamaan garis air meteorik akan digunakan untuk mencari daerah imbuhnya dengan mensubsitisi kandungan isotop stabil pada perpotongan garis tersebut kedalam persamaan antara elevasi dan kandungan isotop yang telah diperoleh sebelumnya.

Setelah memperhatikan bahwa secara umum kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dari sampel-sampel yang telah dikumpulkan dari berbagai sumber air bervariasi secara signifikan. Dengan demikian, penentuan daerah imbuh dilakukan dengan cara yang kedua di atas. Hubungan antara kandungan isotop stabil $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dari lima sumber air utama yang mempunyai debit yang relatif besar diberikan dalam Tabel 4.

data visual di lapangan, yaitu terdapat banyak sampah domestik yang dijumpai di aliran sungai bawah tanah Gua Baron. Sedangkan air sumber Ponjong berasal dari daerah imbuh dengan elevasi tertinggi, yaitu antara 423 - 449 m dpl. Elevasi daerah imbuh ini juga menggambarkan perkiraan bahwa daerah tersebut merupakan pegunungan yang terletak di sebelah utara Gunungkidul. Berdasarkan data topografi sebagaimana dijelaskan di atas, maka daerah yang memiliki elevasi antara 200 - 500 m dpl berada di zone Baturagung yang terletak di utara Wonosari. Zone ini secara geologi didominasi oleh batuan induk vulkanik dan sedimen tufan yang merupakan rangkaian Punggungan Baturagung (*Baturagung Range*) dengan elevasi antara 200 - 700 m dpl.

Tabel 4. Perhitungan elevasi 5 sumber air sungai bawah tanah berdasarkan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$

No.	Lokasi Sampling	Hubungan $\delta^2\text{H}$ terhadap $\delta^{18}\text{O}$ beberapa sumber air sungai bawah tanah Gunungkidul	Titik potong $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ pada LMWL		Elevasi Daerah Imbuh (meter)	
			$-\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	Dari Isotop ^2H : El = -39,603 $\delta^2\text{H}$ -1610,2	Dari Isotop ^{18}O : El = -308,69 $\delta^{18}\text{O}$ -1892
1	Ngobaran	$\delta^2\text{H} = 4,641$ $\delta^{18}\text{O} = -15,657$	-49,5	-7,20	330	350
2	Ngreneng	$\delta^2\text{H} = 5,914$ $\delta^{18}\text{O} = -6,047$	-48,0	-7,00	268	291
3	Baron	$\delta^2\text{H} = 5,485$ $\delta^{18}\text{O} = -8,830$	-47,0	-6,90	237	251
4	Seropan	$\delta^2\text{H} = 4,651$ $\delta^{18}\text{O} = -14,89$	-49,0	-7,00	268	330
5	Ponjong	$\delta^2\text{H} = 4,586$ $\delta^{18}\text{O} = -17,213$	-52,0	-7,5	423	449

Tabel 4 menunjukkan bahwa elevasi daerah imbuh kelima sumber utama air sungai bawah tanah di daerah Gunungkidul berkisar antara 200 - 500 m di atas permukaan air laut (dpl). Daerah imbuh terkecil yaitu air sungai dari Baron dengan elevasi antara 237 - 251 m dpl. Hal ini menunjukkan bahwa air sungai bawah tanah tersebut cenderung mengalami kontaminasi oleh air permukaan sekitarnya sebagai akibat letak daerah imbuh yang berada di dataran rendah. Hal ini dikuatkan

KESIMPULAN

Hasil studi kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ yang bervariasi secara signifikan sebagai fungsi waktu menunjukkan bahwa waktu tinggal (*residence time*) dari sumber air tersebut relatif singkat. Ini mengindikasikan pula bahwa daerah imbuh berada pada jarak yang relatif tidak terlalu jauh.

Dari hasil analisis kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ diperoleh data bahwa

elevasi daerah imbuhan beberapa sumber air dalam gua bawah air pada sistem sungai bawah tanah Gunungkidul yaitu berkisar antara 200 - 500 m dpl dengan perkiraan daerah imbuhan di zone Baturagung yang merupakan daerah pegunungan dengan batuan induk vulkanik dan sedimen tufan serta memiliki elevasi antara 200 - 700 m dpl.

Dari lima sumber air utama dalam lokasi penelitian dengan debit aliran yang relatif lebih besar menunjukkan bahwa kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ Gua Baron lebih kaya (*enrich*) jika dibandingkan dengan kandungan isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ sumber air lainnya. Hal ini disebabkan oleh dua kemungkinan yaitu daerah imbuhan yang lebih rendah (dekat) atau proses penguapan yang telah terjadi atau adanya interaksi dengan air permukaan (kontaminasi).

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagian kegiatan penelitian ini dibiayai oleh proyek kerjasama antara BATAN dengan Kemenristek pada program riset Blockgrant 2010 - 2011.

DAFTAR PUSTAKA

1. SATRIO, dkk., Karakteristik Air Tanah Dangkal Kota Semarang Pada Musim Penghujan Berdasarkan Pendekatan Isotop Stabil (^{18}O , ^2H) dan Kimia Air, *J. Ilmiah Aplikasi Isotop Radiasi*, **11** (1), 73-83 (2015).
2. CHENG, A-H., D., SIDAURUK, P., A Ground-Water Flow Mathematica Tool Package, *Groundwater*, **34** (1), 41-48, (1998).
3. SIDAURUK, P., PUJIINDIYATI, E.R., dan SATRIO, Subsurface Flow and Surface Water Interactions Quantification in Gunungkidul Karst Area Using Hydro-Chemical and Stable Isotopes Data Variations, *J. Ilmiah Aplikasi Isotop Radiasi*, **11** (1), 65-72 (2015).
4. ADJI, T.N., Pemisahan Aliran Dasar Bagian Hulu Sungai Bribin pada Aliran Gua Gilap, di Kars Gunung Sewu, Gunung Kidul, Yogyakarta, *J. Geologi Indonesia*, **5** (3), 165-175 (2011).
5. RUSMANTO, T., MULYONO dan IRIANTO, B., Identifikasi Gross β dan Pengukuran Parameter Air di Perairan Wonosari, Gunungkidul, Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Yogyakarta (2011).
6. NUGROHO, B., dan PRANANTYA, P.A., Klasifikasi Geoteknik Gua Sungai Bawah Tanah Daerah Seropan Wonosari - Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Prosiding Simposium Seminar Geomekanika Ke-1, (2012).
7. CAHYADI, A., AYUNINGTYAS, E.A. dan PRABAWA, B.A., Urgensi Pengelolaan Sanitasi Dalam Upaya Konservasi Sumberdaya Air di Kawasan Karst Gunungsewu Kabupaten Gunungkidul, Indonesian, *J. of Conservation*, **2** (1), 23-32 (2013).
8. YIDANA, S.M., The Stable Isotope Characteristics of Groundwater in the Voltaian Basin - An Evaluation of the Role of Meteoric Recharge in the Basin, *Journal of Hydrogeology & Hydrologic Engineering* 2.2, Scitechnol (2013).
9. HARYONO, E., Geomorfologi Sebagai dasar Perlindungan dan Pencegahan Kawasan Karst, Makalah Seminar, Hidrologi dan Pengelolaan Kawasan Karst, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta, (2000).

10. RIFAI, M.H., SUDARGONO, A., dan MULYONO, Kajian Potensi Ekowisata Karst Kabupaten Gunungkidul Tahun 2011, Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, LPPM Univet Bantara Sukoharjo, (2011).
11. <http://bpbkgunungkidul.blogspot.co.id/2014/01/pembagian-zone-kabupaten-gunungkidul.html#>, di salin tanggal 28 Januari 2015.
12. SURONO, TOHA, B., dan SUDARNO, I., Peta Geologi Lembar Surakarta-Giritontro, Jawa, Skala 1:100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, (1992).
13. HENDRIKSSON, N., KARHU, J. and NIKKOSKI, P., ^{18}O , ^2H and ^3H Isotopic Composition of Precipitation and Shallow Groundwater in Olkiluoto, Working Report 2014-69, Posiva - Olkiluoto, Finland (2014).
14. IAEA/WMO, Global Network of Isotopes in Precipitation Technical Procedure for GNIP Stations, (2013).
15. HAMED, Y., Stable Isotope Ratios in Meteoric Waters in El Kef Region, Northwestern Tunisia: Implications for Changes of Moisture Sources, *Earth Science & Climatic Change* 5, 2-6, (2014).
16. MENG, Y., LIU, G., and LI, M., Tracing the Sources and Processes of Groundwater in an Alpine Glacierized Region in Southwest China: Evidence from Environmental Isotopes, *Water* 7, 2673-2690 (2015).
17. MUHAMMAD, S.B., SADIQ, U., Analysis of Stable Isotopic Composition of Precipitation in Katsina State In Nigeria As An Indication of Water Cycle, *Advances in Physics Theories and Applications* 33 (2014).
18. MUSTAFA, O., MERKEL, B., and WEISE, S.M., Assessment of Hydrogeochemistry and Environmental Isotopes Karst Springs of Makook Anticline, Kurdistan Region, Iraq, *Hydrology* 2, 48-68 (2015).
19. GAJ, M., *et.al.*, In-situ unsaturated zone stable water isotope (^2H and ^{18}O) measurements in semi-arid environments using tunable off-axis integrated cavity output spectroscopy, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 12, 6115-6149 (2015).
20. AL-CHARIDEH, A., Recharge rate estimation in the Mountain karst aquifer system of Figh spring, Syria, *Environmental Earth Sciences*, 65.4, 1169-1178 (2012).
21. LIU, Y., and YAMANAKA, T., Tracing groundwater recharge source in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry, *Journal of Hydrology*, 464-465, 116-126 (2012).
22. EDIRISINGHE, E.A.N.V., *et.al.*, Isotopic Variations In Natural Water and Groundwater Recharge Conditions in The Kalaoya Basin, Sri Lanka, *Ceylon Journal of Science (Physical Sciences)* 18, 09-16 (2014).
23. SHARMA, B., *et.al.*, Water Resource Management through Isotope Technology in Changing Climate, *American J. of Water Resources*, 3 (3), 86-91 (2015).

