

Studi Variabilitas Isotop Airhujan Sebagai Fungsi Elevasi untuk Mendapatkan Merapi *Meteoric Water Line* (MMWL)

Agus Budhie Wijatna¹⁾, Sudarmadji²⁾, Sunarno³⁾, Heru Hendrayana⁴⁾

¹⁾ Sekolah Pascasarjana/Fakultas Teknik UGM (gusbudiftugm@gmail.com)

²⁾ Prodi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana UGM (paksudarmadji@yahoo.com)

³⁾ Prodi Teknik Fisika, Fak Teknik UGM (cfs_sunarno@yahoo.com)

⁴⁾ Prodi Teknik Geologi, Fak. Teknik UGM (heruha@yahoo.com)

Abstract

Theoretically environmental isotopic compositions of precipitation decrease with increasing altitude. Linear regression analysis was applied to environmental isotopic compositions ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) data on 15 precipitation samples collected along an altitudinal 126 to 1260 m.asl from November 2011 to February 2012 to determine the local meteoric water line for southern slope of mount Merapi. Merapi meteoric water line (MMWL) is an equation that describes the relationship between isotopic compositions of precipitation with altitude. This study was completed as part of a larger research of the groundwater dynamics studies using natural isotopes for southern slope of mount Merapi.

Isotopic compositions of precipitation samples were measured using Liquid-Water Stable Isotope Analyzer LGR DLT-100 at the Center for the Application of Isotopes & Radiation Technology Laboratory, National Nuclear Energy Agency (BATAN), Jakarta. Regression results for the precipitation samples for southern slope of mount Merapi yielded a MMWL defined by the equation $\delta^2\text{H}=8.332 \delta^{18}\text{O}+15.068$ ($r^2 =0,998$); the change of isotopic compositions in precipitation with altitude of about $-1.2\%d100\text{m}$ for deuterium and $-0.1\%d100\text{m}$ for oxygen-18.

This equation will be useful as reference for hydrological dynamics studies on the southern slope of mount Merapi that use isotopes of ^2H and ^{18}O to trace sources of groundwater recharge, to evaluate mixing of sea-water and groundwater, to analyze groundwater-mineral exchange, and to analyze many other groundwater contamination problems.

Keywords: precipitation, isotope ratio, isotopic composition, m.asl, MML .

1. Pendahuluan

Pemanfaatan isotop deuterium (^2H -atau D) dan oksigen-18 (^{18}O) sebagai perunut dalam studi dinamika air pada siklus hidrologi sudah banyak digunakan. Menurut Kresiv (2010) dan Mazor (1997), aplikasi hidroisotop untuk menentukan asal-usul airtanah di hilir (di sumur, mataair, danau, dan lain-lain) dapat dilakukan dengan cara membandingkan nilai rasio isotop air (R), yakni $\text{D}/^1\text{H}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ di hilir dengan rasio isotop air di hulu (daerah resapan air) dengan mengacu pada *Global Meteoric Water Line* (GMWL). *Global Meteoric Water Line* adalah persamaan yang menggambarkan variasi rasio isotop $\text{D}/^1\text{H}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ pada air yang di *sampling* dari 91 stasiun tadah hujan, air danau, dan air sungai pada berba-

gai elevasi di berbagai negara di dunia (Dansgaard, 1964 dan NN, 1983). Apabila koordinat komposisi isotop sampel air yang diambil dari mataair berimpit di sepanjang garis GMWL maka dapat disimpulkan sampel air di mataair bukan berasal dari daerah resapan air atau akuifer di atasnya, tetapi berasal dari airhujan di sekitarnya atau berasal dari akuifer lokal (NN, 1983 dan Kresic, 2010). Namun apabila komposisi isotop air di daerah resapan air samalmirip dengan di mataair, dan tidak berimpit dengan GMWL, maka dapat dipastikan airtanah di mataair tersebut berasal dari daerah resapan atau berasal dari akuifer yang berada di atasnya (Mazor, 1997 dan Kresic 2010).

Pada umumnya, penggunaan isotop sebagai perunut pada penelitian airtanah di Indonesia menggunakan GMWL sebagai acuan untuk menentukan genesis sampel air yang di *sampling* dari tempat yang berbeda-beda. Penentuan genesis air berdasarkan nilai rasio isotop D/¹H dan ¹⁸O/¹⁶O memiliki akurasi yang tinggi yang tidak mungkin diperoleh melalui pendekatan topografi, hidrologi dan hidrogeologi. mengingat karakteristik isotop airhujan (*meteoric water*) sangat tergantung pada letak geografis dan faktor iklim, maka penggunaan *GMWL* sebagai acuan untuk menentukan genesis air di semua lokasi di belahan dunia menjadi tidak tepat dan tidak akurat. Terutama jika digunakan sebagai acuan untuk meneliti dinamika air di daerah Sleman.

Berdasarkan klasifikasi Schmidt-Ferguson daerah Sleman memiliki tipe iklim C (agak basah) dan tipe iklim D (sedang). Jenis hujan di lereng Merapi bagian selatan termasuk hujan orografis yang banyak dipengaruhi oleh penguapan perairan Samudra Hindia yang luas dan di daerah ini pengaruh angin muson barat lebih dominan daripada angin muson timur, sehingga presipitasi orografis merata di lereng selatan Merapi sangat tinggi, yakni > 2500 mm per tahun. Dengan demikian kondisi klimatologi dan curah hujan di lereng selatan Merapi jauh berbeda dengan kondisi di 91 stasiun penadah hujan di dunia yang digunakan untuk menentukan *GMWL*.

Oleh karena itu dalam penelitian ini akan ditentukan persamaan *Merapi Meteoric WaterLine (MMWL)*, yaitu suatu persamaan yang menggambarkan bagaimana variabilitas komposisi isotop ²H dan ¹⁸O airhujan sebagai fungsi elevasi di lereng selatan Gunung Merapi.

2. Fundamental

Siklus hidrologi adalah perjalanan air mulai dari laut ke udara, permukaan tanah, akuifer, sungai, danau, dan kembali lagi ke laut melalui beberapa proses, tahapan dan perubahan wujud air. Siklus hidrologi diawali dengan penguapan secara alamiah air laut oleh matahari. Siklus hidrologi terjadi di lapisan atmosfer bumi terbawah, yaitu di lapisan troposfer yang memiliki ketebalan 8 km di daerah kutub dan 18 km di khatulistiwa. Karena atmosfer bersifat termam-

patkan (*compressible*), maka semakin tinggi lokasi, semakin rendah tekanan atmosfernya. Dengan demikian tekanan atmosfer di pantai lebih tinggi daripada tekanan atmosfer di pegunungan. Perbedaan tekanan atmosfer ini menyebabkan massa udara yang banyak mengandung uap air laut secara alamiah terangkat dari pantai ke puncak gunung yang tekanannya lebih rendah. Menurut (NN, 1983), fenomena alam ini menyebabkan suhu massa udara yang banyak mengandung banyak uap air menjadi turun sebagai fungsi elevasi; semakin tinggi elevasi-semakin rendah suhu massa udaranya (*lapse rate*).

Oleh karena itu proses evaporasi lebih banyak terjadi di dataran rendah dan sebaliknya di dataran tinggi lebih banyak terjadi proses kondensasi. Proses evaporasi dan kondensasi ini menyebabkan air dalam siklus hidrologi pada berbagai elevasi memiliki rasio isotop (*R*), yakni *D/H* dan ¹⁸O/¹⁶O yang spesifik. Karena setiap lokasi memiliki nilai *R* yang spesifik, maka spesifikasi nilai *R* dapat digunakan sebagai indikator untuk mengetahui asal-usul air maupun untuk studi hidrologi lainnya. Air di hilir meskipun di ambil dari lokasi berbeda-beda akan memiliki nilai *R* yang sama/mirip jika air tersebut berasal dari hulu (daerah resapan air) yang sama. Analisis terhadap nilai *R* ini juga dapat digunakan untuk membedakan apakah air yang ada di sumur, danau, atau mataair berasal dari air hujan dan akuifer lokal atau berasal dari daerah resapan di atasnya.

Karena nilai *R* sangat kecil, maka untuk memudahkan disepakati suatu konvensi yang berlaku secara internasional, yakni menyatakan rasio isotop *D/H* dan ¹⁸O/¹⁶O dalam air sampel relatif terhadap nilai *R* dalam *Standard Mean Ocean Water (SMOW)*, dimana secara internasional memiliki nilai *SMOW* sebagaimana disajikan pada Tabel 1 berikut [Brian, 2008].

Dengan mengacu nilai *SMOW* di Tabel 1, maka rasio isotop *D/H* dan ¹⁸O/¹⁶O dalam air sampel dinyatakan relatif terhadap rasio isotop *D/H* dan ¹⁸O/¹⁶O pada *SMOW* dan dinyatakan dalam notasi $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ menggunakan persamaan [NN, 1983; Mazor, 1997; Kresic, 2010]:

$$\delta_{smp} = \frac{R_{smp} - R_{std}}{R_{std}} \times 1000 \text{ ‰} \quad (1)$$

Tabel 1 Rasio isotop hidrogen dan oksigen pada SMOW.

	Rasio, H/L (=R _{std})	Nilai, H/L	% H	% L
<i>Standard Mean Ocean Water (SMOW)</i>	D/ ¹ H	0.00015576	0.015574	99.984426
	¹⁷ O/ ¹⁶ O	0.0003799	0.0379	99.76206
	¹⁸ O/ ¹⁷ O	0.0020052	0.0020052	99.76206

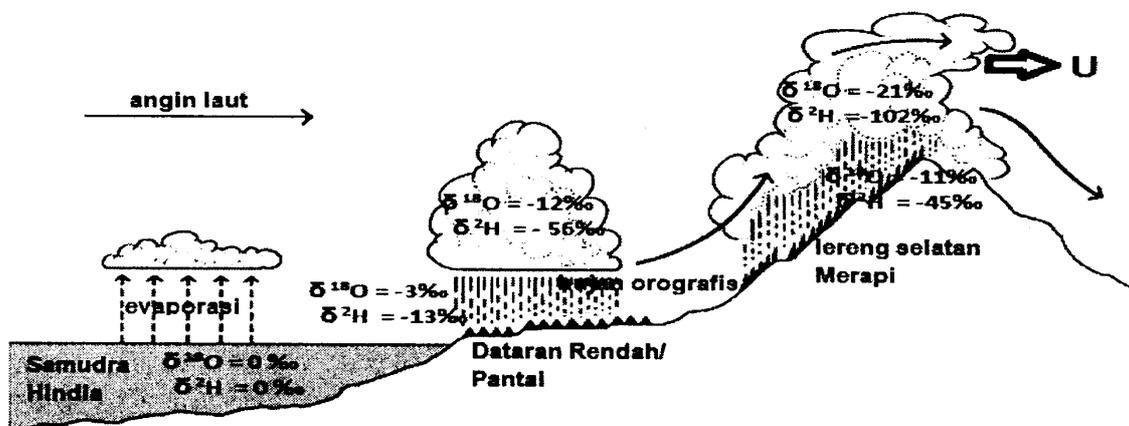
Catatan: H= heavy isotopes dan L = Light isotopes

Penggunaan rasio isotop air laut sebagai SMOW berdasarkan pertimbangan bahwa proses evaporasi terbesar dalam siklus hidrologi terjadi di lautan, sehingga rasio isotop D/¹H atau ¹⁸O/¹⁶O di laut adalah rasio terbesar, oleh karena itu secara internasional air laut dijadikan acuan, dengan nilai rasio isotop laut (R_{std}) untuk (D/¹H)_{std} = 0.00015576 dan R_{std} untuk ¹⁸O/¹⁶O_{std} = 0.0020052 (Tabel 1). Berdasarkan konvensi ini maka kebanyakan air (selain air-laut) memiliki rasio isotop (δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW} relatif terhadap SMOW < 0‰ (bernilai negatif) atau berdasarkan Persamaan 1 berlaku:

- jika $R_{smp1} > R_{std}$ maka nilai $\delta_{smp1} > 0$, artinya kadar D atau ¹⁸O dalam sampel air lebih kaya (*enriched*) daripada SMOW,
- jika $R_{smp1} < R_{std}$ maka nilai $\delta_{smp1} < 0$, artinya kadar D atau ¹⁸O dalam sampel air lebih miskin (*depleted*) daripada SMOW, dan
- jika $R_{smp1} = R_{std}$ maka nilai $\delta_{smp1} = 0$, artinya kadar D atau ¹⁸O dalam sampel air = SMOW atau juga dapat diartikan bahwa sampel air telah terkontaminasi oleh air laut.

Gambar 1 menunjukkan bahwa air hujan yang jatuh di dataran rendah memiliki nilai

(δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW} yang lebih kaya (*enriched*) daripada yang jatuh di puncak gunung (*depleted*). Apabila kemudian air hujan (di puncak gunung/hulu) infiltrasi ke dalam tanah, dan sejak infiltrasi, perkolasi, hingga keluar ke permukaan tanah (di hilir) tidak dipengaruhi kondisi lingkungan yang ekstrem, maka nilai (δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW} airtanah di hilir (di sumur/mataair) akan relatif sama dengan nilai rasio isotop di hulu (di lokasi air hujan jatuh) [Juanda, 2004]. Oleh karena itu sumur/mataair yang airnya berasal dari daerah resapan air (*water recharge area*) yang elevasinya lebih tinggi akan memiliki nilai (δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW} lebih *depleted* dari pada nilai (δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW} air sumur/mataair yang berasal dari air hujan lokal. Dengan demikian mataair yang airnya berasal dari air hujan lokal atau berasal air dari daerah resapan yang elevasinya lebih tinggi dapat dibedakan dengan mudah berdasarkan nilai (δD)_{SMOW} dan (δ¹⁸O)_{SMOW}. Fenomena alam ini kemudian menjadi konsep dasar penggunaan isotop alam sebagai perunut untuk mempelajari dinamika air dalam siklus hidrologi.



Gambar 1. Fraksinasi isotop D dan ¹⁸O air hujan dalam siklus hidrologi (dimodifikasi dari NN, 2005)

Di samping elevasi, rasio isotop $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ juga tergantung pada frekuensi dan presipitasi. Semakin tinggi frekuensi dan presipitasi, semakin kecil (depleted) nilai $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ pada airhujan, dan sebaliknya semakin sedikit frekuensi dan presipitasi semakin besar (*enriched*) nilai $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ pada airhujan. Berdasarkan fenomena ini, maka pengaruh frekuensi dan presipitasi terhadap nilai $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ di setiap lokasi pengambilan sampel airhujan harus direratakan dengan menggunakan persamaan:

$$\delta^{18}O, \text{‰} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta_i^{18}O}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (2)$$

$$\delta D, \text{‰} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta_i D}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3)$$

3. Metodologi

Bahan dan peralatan

- Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1 : 25,000; Kabupaten Sleman, 2008, sebagai peta dasar.
- Peralatan tadah hujan untuk menampung sampel airhujan. Sebelum digunakan peralatan tadah hujan diisi minyak parafin (BJ minyak parafin < BJ air). Minyak parafin berfungsi untuk meminimalisir penguapan sampel airhujan sebelum diambil.
- Botol plastik kedap udara untuk tempat sampel airhujan, ukuran 30 ml.
- Global Positioning System (GPS) Merk Garmin*, untuk menentukan koordinat lokasi pengambilan sampel airhujan.
- Liquid-Water Stable Isotope Analyzer (LWSIA)-LGR DLT-100*, untuk mengukur rasio isotop (D/¹H) dan (¹⁸O/¹⁶O) pada sampel airhujan.
- Larutan standard untuk mengkalibrasi (*LWSIA)-LGR DLT-100*.

Tahapan penelitian

- Menentukan 5 lokasi pengambilan sampel air hujan yang elevasinya berbeda-beda di lereng

selatan Gunung Merapi dan mencatat koordinat lokasi menggunakan GPS untuk kemudian di plot ke dalam Peta RBI, sehingga diperoleh Tabel 2 dan Peta Lokasi Pengambilan Sampel Airhujan (Gambar 2).

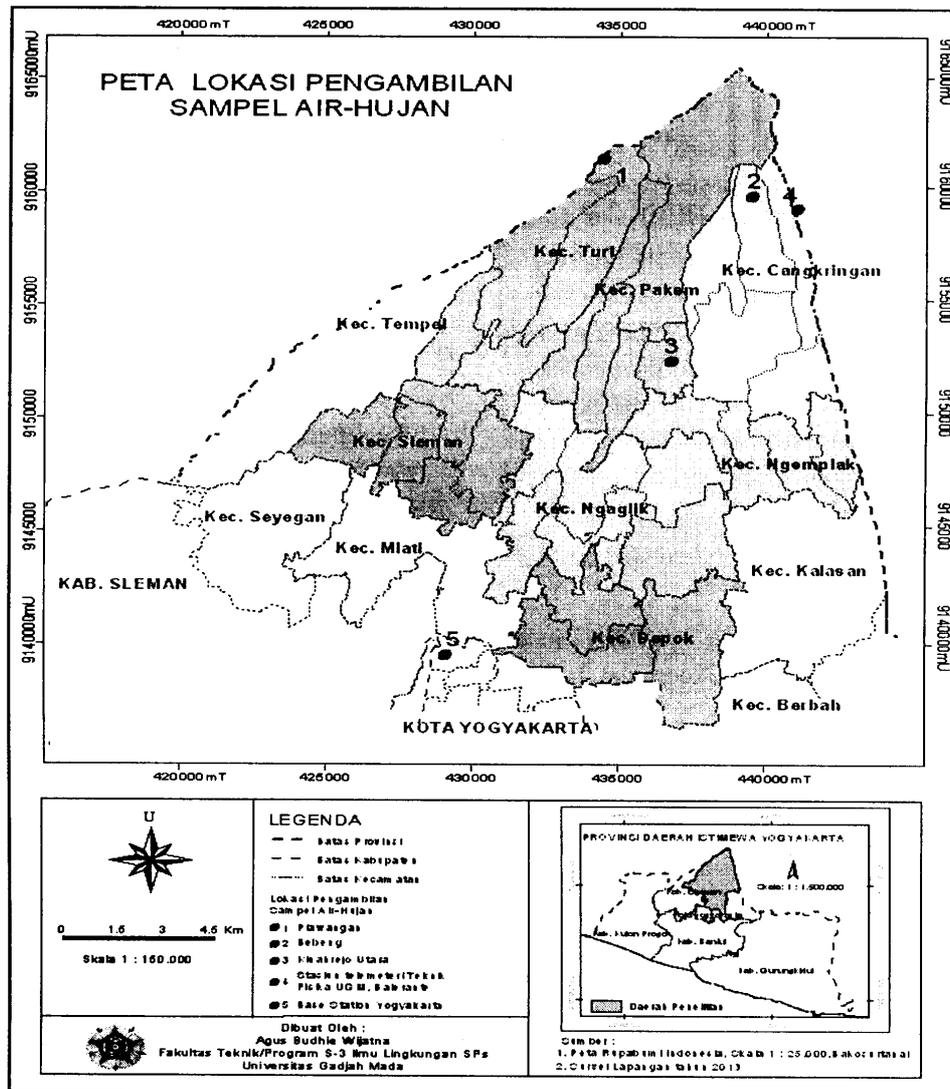
- Meletakkan peralatan tadah hujan di lokasi-lokasi yang telah ditentukan.
- Mengambil sampel airhujan di bak tadah hujan menggunakan 3 botol sampel.
- Pengambilan sampel airhujan di setiap lokasi dilakukan 3x pada waktu yang berbeda, yakni pada bulan November 2011, Desember 2011, dan Februari 2012.
- Mengkalibrasi peralatan *LWSIA-LGR DLT-100* dengan mengukur rasio isotop larutan standard di Laboratorium Kebumihan dan Geologi, Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Atom Nasional (PATIR-BATAN), Jakarta. Data hasil kalibrasi disajikan pada Tabel 3.
- Mengukur average means ratio isotop (D/¹H) dan (¹⁸O/¹⁶O) sampel airhujan, hasilnya disajikan di Tabel 4 kolom 4 dan 6.
- Menghitung actual ratio isotop (D/¹H) dan (¹⁸O/¹⁶O) sampel airhujan menggunakan persamaan kalibrasi (Persamaan 4 dan 5), hasilnya disajikan pada Tabel 4 kolom 5 dan 7
- Menghitung rasio isotop (δD) dan $(\delta^{18}O)$ relatif terhadap *SMOW* menggunakan Persamaan 1, dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.
- Mereratakan data presipitasi tahun 2000-2009 dari 5 stasiun BMKG DIY dengan Metode Aritmetik sehingga diperoleh data pada Tabel 6.
- Menghitung nilai rasio rerata $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ sampel airhujan dari hasil 3x pengukuran di setiap lokasi dengan menggunakan Persamaan 2 dan 3. Hasilnya disajikan pada Tabel 7.
- Mem-plot data nilai rasio rerata dan $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ sampel airhujan ke diagram $\delta^{18}O-\delta^2H$ untuk mendapatkan *MMWL* serta persamaan $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ sebagai fungsi elevasi. Hasil *plotting* disajikan di Gambar 3.

Tabel 2. Koordinat dan elevasi lokasi pengambilan sampel airhujan

No	Nama Lokasi	Latitude		Koordinat		Elevasi (m.dpl)
		LS	BT	X (m)	Y (m)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Plawangan	07° 35.338'	110° 25.540'	452210	9151361	1260
2	Bebeng	07° 34.930'	110° 26.590'	439300	9160713	1205
3	Kinahrejo Utara	07° 34.460'	110° 26.360'	448536	9149453	1136
4	Stasiun Telemeteri Tek. Fisika UGM, Balerante	07° 33.450'	110° 27.450'	440835	9160132	940
5	Base Station Yogya	07° 46.315'	110° 21.190'	428916	9140476	126

Tabel 3 Data kalibrasi peralatan LWSIA-LGR DLT-100

No Sampel	Rasio D ¹ H, x10 ⁻⁴		Rasio ¹⁸ O/ ¹⁶ O, x10 ⁻³	
	Actual	Average means	Actual	Average means
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Std1	1.43453	1.441	1.982020	1.9831
Std2	1.48967	1.492	1.990843	1.9909
Std3	1.54232	1.542	1.999225	1.9993



Gambar 2. Peta lokasi pengambilan sampel airhujan.

4. Hasil dan Pembahasan

Tabel 3 menyajikan hasil perhitungan rasio isotop (D/H) dan ($^{18}O/^{16}O$) secara teoritis terhadap larutan standard sehingga diperoleh nilai *actual ratio*, sedangkan pengukuran terhadap larutan standard menggunakan peralatan *LWSIA-LGR DLT-100* menghasilkan *average means ratio*.

Grafik kalibrasi yang dibuat berdasarkan data pada Tabel 3 menghasilkan persamaan:

$$Y = 1.067.X - 0.103 \text{ dengan } R^2 = 0.999, \text{ untuk D} \tag{4}$$

$$Y = 1.061.X - 0.122 \text{ dengan } R^2 = 0.998, \text{ untuk } ^{18}O \tag{5}$$

dengan: $Y = \text{actlral ratio}$ dan $X = \text{average means ratio}$ (dari hasil pengukuran).

Persamaan 4 dan 5 digunakan ulltuk mengkonversi *average means ratio* isotop sampel airhujan yang diperoleh dari hasil pengukuran laboratorium menggunakan *LWSIA-L GR DLT-*

100, menjadi *actual ratio* isotop sampel airhujan. Hasil konversi disajikan dalam Tabel 4. Sesuai dengan konvensi internasional yang berlaku, maka data *actual ratio* isotop (RW3 yang tercantum di Tabel 4 kolom 5 dan 7 harus dinyatakan secara relatif terhadap *Standard Mean Ocean Water (SMOW)* dengan menggunakan. Persamaan 1, dengan nilai R_{srd} untuk $D/H = 1.5576 \times 10^{-4}$ dan R_{sld} untuk $^{18}O/^{16}O = 2.0052 \times 10^{-3}$ (Tabel 1). Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 5.

Data presipitasi dari stasiun pemantau curah hujan di Wonokerto, Bangun Kerto, Wonorejo, Pakem Binangun, Argomulyo, dan Umbul Martani, diperoleh dari kantor BMKG DIY untuk pemantauan tahun 2000-2009 [BMKG-DIY, 2011]. Data presipitasi tahunan dari 6 stasiun pemantau curah hujan tersebut kemudian direratakan dengan metode aritmatik sehingga diperoleh nilai prespitasi bulanan rerata di setiap lokasi sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 4. Nilai rasio isotop (D/H) dan ($^{18}O/^{16}O$) sampel airhujan terukur (kolom 4 dan 6) dan setelah dikoreksi (kolom 5 dan 7)

No.	Kode Lokasi	Nama Lokasi	$D/H (x10^{-4})$		$^{18}O/^{16}O (x10^{-3})$	
			Average means ratio	Actual ratio (R_{smp1})	Average means ratio	Actual ratio (R_{smp1})
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	P-1	Plawangan	1.47802	1.48280	1.988209	1.990021
2	P-2	Bebeng	1.48058	1.48539	1.988525	1.990341
3	P-3	Kinahrejo Utara	1.48173	1.48654	1.988801	1.990622
4	P-4	Balerante	1.48791	1.49279	1.989808	1.991645
5	P-5	Yogya	1.50039	1.50539	1.991604	1.993470

Tabel 5. Rasio isotop deuterium dan oksigen-18 airhujan relatif terhadap SMOW.

No	Lokasi	Elevasi, m.dpl	$(\delta D, \text{‰})_{SMOW}$			$\delta^{18}O, \text{‰}$		
			Nov'11	Des'11	Feb'12	Nov'11	Des'11	Feb'12
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	Plawangan	1260	-47,98	-47,48	-48,49	-7,64	-6,99	-7,98
2	Bebeng	1205	-46,72	-45,07	-47,09	-7,34	-6,96	-7,84
3	Kinahrejo Utara	1136	-45,69	-45,09	-45,98	-7,29	-6,88	-7,56
4	Balerante	940	-41,69	-41,04	-42,01	-7,02	-6,13	-7,05
5	Yogya	126	-32,14	-33,89	-34,09	-5,54	-5,86	-6,03

Tabel 6. Data presipitasi bulanan rerata di 5 lokasi penelitian

No.	Lokasi	Elevasi (m.dpl)	Presipitasi (P _i), mm		
			Nov'11	Des'11	Feb'12
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	Plawangan	1260	306	287	355
2	Bebeng	1205	306	287	355
3	Kinahrejo Utara	1136	306	287	355
4	Stasiun Telemeteri Tek. Fisika UGM, Balerante	940	301	280	342
5	Base Station Yogya	126	281	339	468

Untuk mengetahui pengaruh presipitasi terhadap nilai rasio isotop deuterium dan oksigen-18 sebagai-mana yang tercantum pada Tabel 5, maka diguna-kan Persamaan 2 dan 3 dengan memasukkan data presipitasi rerata pada Tabel 6. Hasil per-hitungan disajikan pada . Tabel 7. Data nilai $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ merupakan data yang sudah memper-hitungkan faktor-faktor yang mempengaruhi variabilitas rasio hidroisotop airhujan.

Tabel 7 menunjukkan bahwa airhujan di tempat yang elevasinya rendah (126 m.dpl) memiliki komposisi isotop yang lebih enriched, yakni 33.52‰ untuk $(\delta D)_{SMOW}$ dan -5.85‰ untuk $(\delta^{18}O)_{SMOW}$; dan sebaliknya sampel airhujan di tempat yang elevasinya tinggi (1260 m.dpl) memiliki rasio isotop lebih *depleted*, yakni -48.02‰ untuk $(\delta D)_{SMOW}$ dan -7.57‰ untuk $(\delta^{18}O)_{SMOW}$; Hasil pengukuran ini sesuai dengan teori sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 1**, yang menyatakan bahwa semakin tinggi elevasi semakin *depleted* komposisi isotop $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ airhujan dan sebaliknya.

Apabila data variasi rasio isotop $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ sampe) airhujan sebagai fungsi elevasi pada **Tabel 7** di *plot* pada diagram $\delta^{18}O\text{‰} - \delta D\text{‰}$ maka diperoleh grafik sebagaimana disajikan pada **Gambar 3** dan persamaan *MMWL*:

$$(\delta D) = 8.332.(\delta^{18}O) + 15,06 \quad (6)$$

dengan $r^2 = 0.998$

Berdasarkan data di Tabel 7 juga dapat dinyatakan bahwa setiap kenaikan elevasi 100m, rasio isotop akan mengalami penurunan -1.2‰ untuk deuterium dan -0.1‰ untuk oxygen-18.

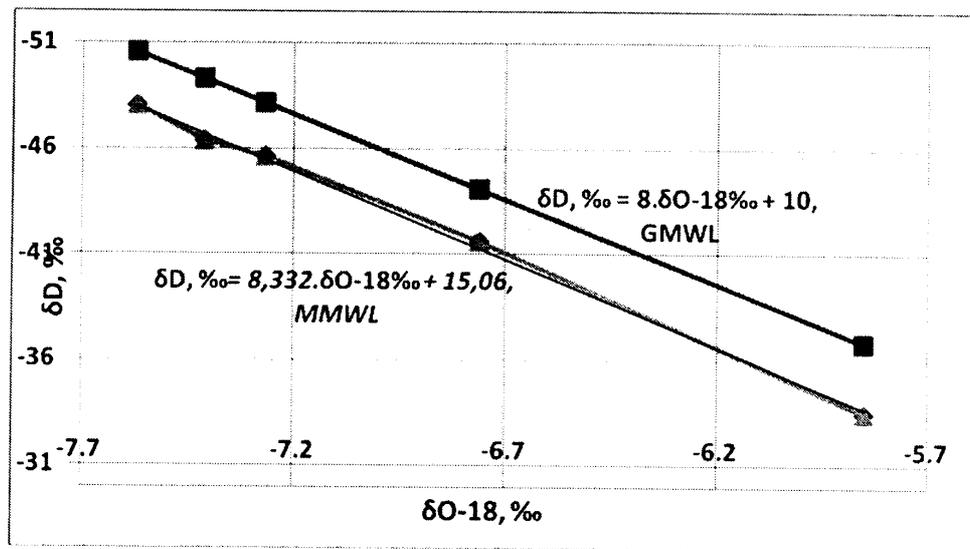
Persamaan *MMWL* yang diperoleh dalam penelitian ini tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian Dansgaard (1964), yakni Garis Air Meteorik Global (*Global Meteoric Water Line, GMWL*) yang mengikuti persamaan:

$$\delta D = 8. \delta^{18}O + 10 \quad (7)$$

Perbedaan nilai *deuterium excess (DE)* dalam penelitian ini ($DE=15,06\text{‰}$) terhadap *GMWL*, ($DE= 10\text{‰}$) disebabkan karena lereng Merapi berada di daerah tropis dan berdasarkan klasifikasi Schmidt-Ferguson daerah ini memiliki tipe iklim C (agak basah) dan tipe iklim D (sedang), sehingga kelembaban udara (*relative humidity*) di kawasan ini relatif tinggi. Karena kelembaban udara tinggi maka suhu di permukaan tanah rendah, sehingga energi kinetik evaporasi juga rendah, akibatnya penguapan isotop deuterium (D , massa = 2) lebih banyak daripada penguapan isotop oksigen-18 (^{18}O , massa =18); oleh karena itu nilai *DE* pada *MMWL* menjadi lebih besar daripada nilai *DE* pada *GMWL*

Tabel 7. Data komposisi isotop sebagai fungsi elevasi

No.	Lokasi	Elevasi (m.dpl)	Komposisi isotop rerata	
			$(\delta D, \text{‰})_{SMOW}$	$(\delta^{18}O, \text{‰})_{SMOW}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Plawangan	1260	-48,02	-7,57
2	Bebeng	1205	-46,36	-7,41
3	Kinahrejo Utara	1136	-45,62	-7,27
4	Stasiun Telemeteri Tek. Fisika UGM, Balerante	940	-41,61	-6,76
5	Base Station Yogya	126	-33,52	-5,85



Gambar 3. Grafik rasio isotop $(\delta D)_{SMOW}$ dan $(\delta^{18}O)_{SMOW}$ sampel airhujan

Kesimpulan

1. Merapi Meteoric Water Line (MMWL) mengikuti persamaan:

$$(\delta D) = 8,332 \cdot (\delta^{18}O) + 15,06,$$

2. Setiap elevasi naik 100m, rasio isotop akan mengalami penurunan -1.2‰ untuk (δD) dan -Kresic, N. dan Stevanovic, Z., 2010. "

Saran

Merapi Meteoric Water Line (MMWL) dapat digunakan sebagai acuan studi dinamika airtanah dalam siklus hidrologi di lereng selatan Merapi yang menggunakan hidroisotop sebagai perunut.

Daftar Notasi

- H = Hydrogen
- O = Oksigen
- D = Deuterium
- m.asl = meters above sea level
- m.dpl = meter di atas permukaan laut
- R_{smp} = rasio D/H atau $^{18}O/^{16}O$ sampel
- R_{std} = rasio D/H atau $^{18}O/^{16}O$ air -laut
- δ_{smp} = rasio D/H atau $^{18}O/^{16}O$ sampel relatif terhadap SMOW, ‰
- P = presipitasi
- DE = Deuterium excess

Daftar Pustaka

Brian Fry, 2008. "Stable isotop Ecology". Springer, New York.

Dansgaard, W., 1964. "Stable isotopes in precipitation ". Tellus, . Swedish Geophysical Society, 436-468

Kresic, N. dan Stevanovic, Z., 2010. "Groundwater Hydrology of Springs. Engineering theory, management, and sustainability". Elsevier, USA. (3):91- 104.

Mazor, Emanuel., 1997. "Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. The Applied Approach". Merce Dekker Ink. 2nd edition. (9): 168-19

NN, 1983. "Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology". Technical Reports Series No. 91. IAEA, Vienna. (2): 19-27; (18):273-279 & (19):285-299.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Propinsi DIY, 20 1 1. "Data Klimatologi periode 2000-2009 Stasiun Yogyakarta ". Stasiun Klimatologi, Yogyakarta.