

## Karakteristik Isotop $^{18}\text{O}$ dan $^2\text{H}$ dari Beberapa Mataair Panas di Jawa Barat

Satrio<sup>1</sup>, Rasi Prasetyo<sup>1\*</sup>, Paston Sidauruk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Jl. Lebak Bulus Raya no. 49, Jakarta 12440

**ABSTRAK** Mataair panas di Jawa Barat tersebar hampir merata dari selatan hingga utara dan umumnya berada di daerah gunung api, baik yang masih aktif maupun yang sudah tidak aktif. Pada tahap eksplorasi panas bumi, keberadaan mataair panas ini sangat menarik untuk diteliti, khususnya terkait komposisi isotopnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik sumber air panas di Jawa Barat dengan menggunakan pendekatan isotop stabil  $^2\text{H}$  dan  $^{18}\text{O}$  dari sejumlah sampel air panas yang diambil dari beberapa lokasi, yang meliputi Gunung Pancar dan Ciseeng, Bogor; Gunung Gede, Cianjur; Santa, Sukabumi; serta Palimanan, Cirebon. Hasil analisis isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sampel air dari beberapa mataair panas di Jawa Barat menunjukkan bahwa karakteristik mataair panas Gunung Pancar dan Sukabumi lebih dominan berasal dari air meteorik. Sementara mataair panas daerah Ciseeng dan Palimanan merupakan hasil interaksi dengan batuan karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Sedangkan mataair panas area Gunung Gede berasal dari hasil interaksi dengan batuan andesitik dengan fraksi air andesitik antara 0,03 hingga 0,21.

**Kata Kunci:** isotop, mataair panas, panas bumi

**ABSTRACT – Stable Isotopes ( $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ ) Characteristics of Several Hot Springs in West Java.** Hot springs locations in West Java are distributed from south to north and are generally associated with active or inactive volcanoes. During the exploration stage, hot springs become a point of interest for geothermal investigation, especially regarding the water isotope compositions. This study aimed to obtain the hot springs' characteristics in West Java based on the  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  isotope compositions. Water samples were collected from several hot springs in West Java, i.e., Gunung Pancar and Ciseeng, Bogor; Gunung Gede, Cianjur; Santa, Sukabumi; and Palimanan, Cirebon. The result shows that the characteristics of Gunung Pancar and Sukabumi hot springs are dominated by meteoric water. Meanwhile, interactions with carbonate rocks occur in Ciseeng and Palimanan hot springs. While, hot springs in Gunung Gede are the product of water interaction with andesitic rocks, with the fraction of andesitic waters between 0.003 to 0.21.

**Keywords:** isotopes, hot springs, geothermal

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan daerah yang dilintasi oleh cincin api atau *ring of fire* dan memiliki potensi panas bumi yang cukup besar, dimana sebagian diantaranya telah dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi terbarukan berupa pembangkit listrik (ESDM, 2017). Sepanjang jalur pegunungan vulkanik yang membentang dari barat Sumatera ke selatan Jawa, tersimpan potensi panas bumi yang terus dikembangkan untuk menghasilkan energi terbarukan dan dimanfaatkan untuk meningkatkan kapasitas energi listrik secara berkesinambungan (Satrio *et al.*, 2015). Potensi energi panas bumi untuk pembangkit listrik di Indonesia diperkirakan sebesar 29 Gigawatt, yaitu hampir setara dengan

---

Naskah masuk : 28 Februari 2020  
Naskah direvisi : 28 September 2020  
Naskah diterima : 16 Oktober 2020

---

\*Penulis korespondensi.  
Email: rasi\_p@batan.go.id

total pasokan listrik nasional saat ini (Mary et al., 2017). Salah satu daerah yang memiliki potensi energi panas bumi cukup tinggi yaitu Jawa Barat dengan perkiraan potensi panas bumi sebesar 3.491 MW dan potensi yang sudah dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik sebesar 1.064 MW (ESDM, 2017).

Keluaran mataair panas memiliki temperatur yang bervariasi, tergantung kedalaman batuan panas yang dilaluinya, maupun proses lain seperti adanya pencampuran dengan airtanah. Di

Indonesia, sumber air panas pada umumnya berasal dari aktivitas vulkanik gunung api, baik yang masih aktif seperti Gunung Tangkuban Parahu dengan sumber mataair panas yang muncul di daerah Ciater dan Wanayasa, maupun yang sudah tidak aktif seperti Gunung Tampomas dengan sumber air panas yang muncul di daerah Conggeang. Selain itu, terdapat mataair panas di Jawa Barat yang juga berasosiasi dengan struktur, seperti di Salabintana, Sukabumi, maupun yang berasosiasi dengan cekungan batuan sedimen,

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel mataair panas dan airtanah pada beberapa daerah di Jawa Barat.

No.	Kode	Lokasi	Tipe	Koordinat UTM		Elevasi (m dpl)
				X	Y	
<i>Palimanan, Cirebon</i>						
1	PL01	Gunung Kromong	Mataair Panas	212466.71	9257246.52	42
2	PL02	Pemandian	Mataair Panas	212466.71	9257246.52	42
3	PL03	Pemandian	Air Sumur	212466.71	9257246.52	42
<i>Sukabumi</i>						
4	SK01	Cikundul	Mataair Panas	711426.00	9228477.00	443
5	SK02	Santa	Mataair Panas	712853.70	9231507.54	495
6	SK03	Santa	Mataair Hangat	712853.70	9231507.54	495
<i>Gunung Pancar, Bogor</i>						
7	PC01	Kawah Merah	Mataair Panas	712749.65	9271290.08	436
8	PC02	Kawah Hitam	Mataair Panas	712713.32	9271430.32	422
9	PC03	Pancar	Mataair Panas	711639.14	9271576.39	502
10	PC04	Pancar	Mataair Panas	711639.14	9271576.39	502
11	PC05	Airtanah Pancar	Air Sumur	712805.95	9271070.49	447
12	PC06	Cilaya	Air Sungai	713002.18	9271283.57	417
<i>Gunung Gede, Cianjur</i>						
13	GD01	Green Apple	Mataair Panas	726050.01	9255538.96	1035
14	GD02	Istana Cipanas	Mataair Panas	725452.11	9255360.79	1068
15	GD03	Kandang Batu	Mataair Panas	718798.56	9250312.92	2437
16	GD04	Kandang Badak	Mataair Dingin	718323.59	9250431.00	2405
17	GD05	Kandang Batu	Air Sungai	718803.07	9251419.02	2166
18	GD06	Telaga Biru	Air Sungai	720363.86	9253641.49	1582
19	GD07	Kawah Wadon	Uap Panas	718942.51	9249914.13	2581
20	GD08	Cipadani	Mataair Panas	719992.33	9251570.86	1990
<i>Ciseeng, Bogor</i>						
21	CS01	Ciseeng	Mataair Panas	688007.00	9288973.00	102
22	CS02	Sawangan	Mataair Hangat	692351.00	9290026.00	116
23	CS03	Ciseeng	Air Sumur	687759.00	9289146.00	103

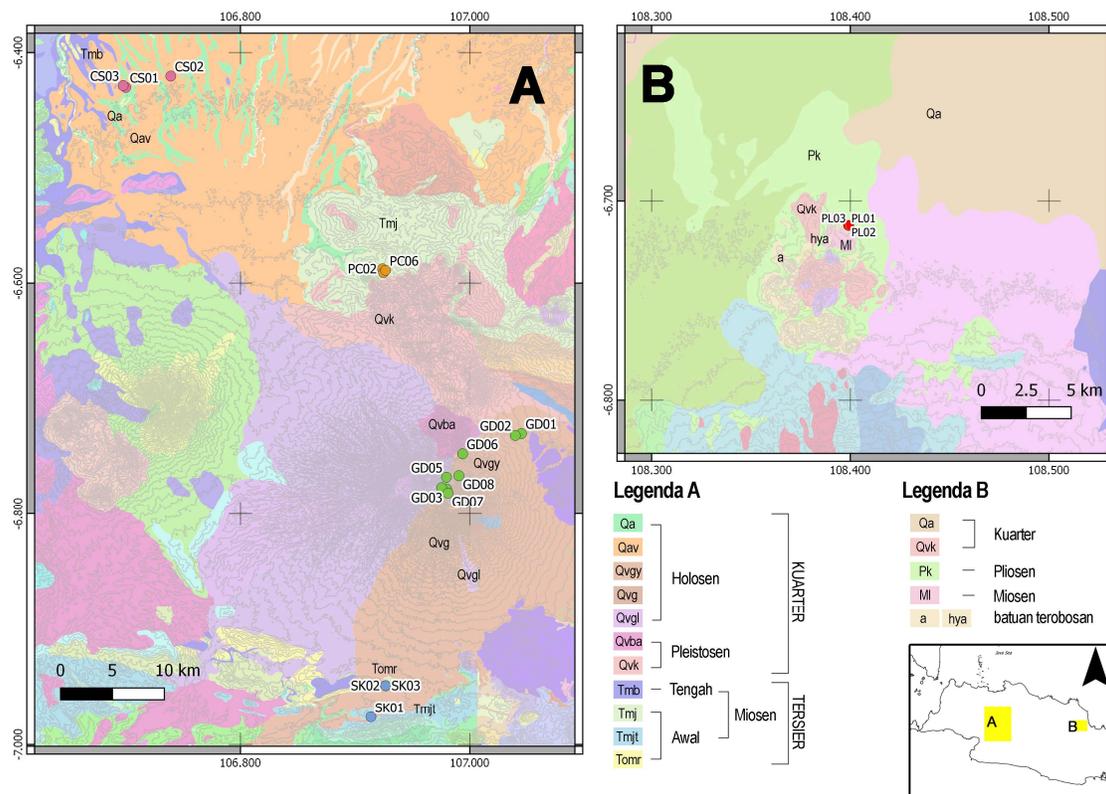
seperti di Gunung Kromong (Herdianita *et al.*, 2012).

Di beberapa tempat, keberadaan sumber air panas ini telah dimanfaatkan sebagai sarana rekreasi dan terapi kesehatan. Sementara itu, di tempat lainnya; seperti di Wayang Windu (Bogie *et al.*, 2008), Kamojang (Suryadarma *et al.*, 2005), dan Awibengkong (Stimac *et al.*, 2008); keberadaan mataair panas ini telah diselidiki melalui pendekatan ilmu kebumihan dan dimanfaatkan untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik.

Keberadaan sumber air panas di berbagai lokasi pada umumnya memiliki karakteristik masing-masing yang sangat bergantung pada lokasi setempat (bersifat lokal) dan kedekatannya dengan sumber panas (Olivier *et al.*, 2011). Penelitian mengenai karakteristik isotop mataair panas ini penting untuk melengkapi studi geokimia pada tahap eksplorasi pendahuluan potensi panas bumi di suatu daerah. Pada tahap

eksplorasi tersebut pendekatan isotop digunakan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik air panas, seperti terkait magmatik, evaporasi, atau interaksi dengan batuan (Hamed, 2014).

Keberadaan mataair panas yang muncul di daerah Palimanan – Cirebon telah dimanfaatkan sebagai sarana rekreasi dan terapi kesehatan. Mataair panas ini sangat menarik untuk dipelajari asal-usulnya, karena lokasinya yang cukup jauh dengan gunung terdekat, yaitu Gunung Ciremai. Melalui pendekatan isotop, asal-usul mataair panas dan airtanah di lokasi tersebut dapat diketahui, yaitu dengan cara mengukur komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  dalam sampel air yang diambil (Meng *et al.*, 2015). Interaksi antara sumber panas dan airtanah dapat ditentukan berdasarkan grafik hubungan  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$ , apakah berasal dari pemanasan batuan atau ada pengaruh magma dari aktivitas gunung api. Dengan latar belakang tersebut, penelitian isotop sumber air panas sangat penting dilakukan dan merupakan



Gambar 1. Peta geologi lokasi penelitian beserta titik pengambilan sampel (Djuri, 1973; Turkandi *et al.*, 1992; Effendi *et al.*, 1998)

bagian dari studi potensi panas bumi disamping studi geologi dan geofisika.

## LOKASI DAN GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Lokasi penelitian berada di Provinsi Jawa Barat, yaitu di daerah Bogor, Sukabumi, dan Palimanan (Cirebon). Mataair panas di daerah Bogor meliputi Gunung Pancar, Gunung Gede, dan Ciseeng; di daerah Sukabumi meliputi mataair panas Cikundul dan Santa; dan di daerah Palimanan, Cirebon meliputi area di sekitar pabrik semen Tiga Roda. Peta lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1 dan koordinat lengkapnya pada Tabel 1.

Daerah Gunung Pancar, Gunung Gede dan Sukabumi terletak dalam radius sekitar 20 km dari puncak Gunung Gede-Pangrango. Gunung Gede Pangrango tersusun atas batuan vulkanik berumur Kuartar, sementara di bagian utara maupun selatan dibatasi oleh batuan sedimen berumur Tersier (Effendi *et al.*, 1998). Di daerah Gunung Gede sendiri tersusun oleh batuan vulkanik dari formasi endapan Gunung Gede yang terdiri atas satuan batuan aliran lava Gunung Gede (Qyl), breksi dan lahar (Qyg), aliran lava andesit basalt (Qvgl), aliran lava basalt (Qvba), serta bongkah dan breksi andesit (Qvk). Di bagian utara, dimana terdapat mataair panas Gunung Pancar, tersusun oleh batuan Tersier dengan formasi batuan yang dominan dari Formasi Jatiluhur (Tmj) yang terdiri atas batugamping, napal dan serpih lempungan. Sementara di selatan, yaitu mataair panas Sukabumi, terletak di batuan vulkanik Gunung Gede berupa breksi tufaan, lahar dan andesit (Qvg) juga endapan Tersier dari anggota Tuff dan Breksi Formasi Jampang (Tmjt) dan Formasi Rajamandala (Tomr) berupa napal tufaan, lempung, batupasir dan batugamping (Effendi *et al.*, 1998).

Sementara mataair panas Ciseeng berada pada batuan dasar berupa batuan Tersier dari Formasi Bojongmanik (Tmb) berupa perselingan batupasir dan batulempung dengan sisipan batugamping; endapan alluvium (Qa) berupa lempung, pasir, kerikil, kerakal; serta kipas alluvium (Qva) berupa tuf halus, tuf pasiran berselingan dengan tuf konglomeratan (Turkandi *et al.*, 1992).

Mataair panas Palimanan, atau biasa dikenal dengan Gunung Kromong, terletak pada batuan dasar berumur Tersier dari Formasi Kaliwangu (Pk) berupa lempung, konglomerat dan lensa batupasir tufaan; kompleks batugamping Kromong (Ml), dan sebagian tertutupi oleh batuan vulkanik Kuartar berupa breksi kompleks Kromong (Qvk). Selain itu, pada lereng Gunung Kromong terdapat singkapan batuan terobosan berupa andesit (a) dan andesit hipersten (hya), terutama di sebelah selatan dan barat, serta sedikit di utara (Djuri, 1995).

## METODE

Metode yang digunakan meliputi metode pengambilan sampel dan metode analisis isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$ .

### Pengambilan sampel

Isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sangat peka terhadap proses fisika seperti penguapan, oleh karena itu untuk mencegah hal tersebut maka pengambilan sampel air dilakukan dengan cara sebagai berikut:

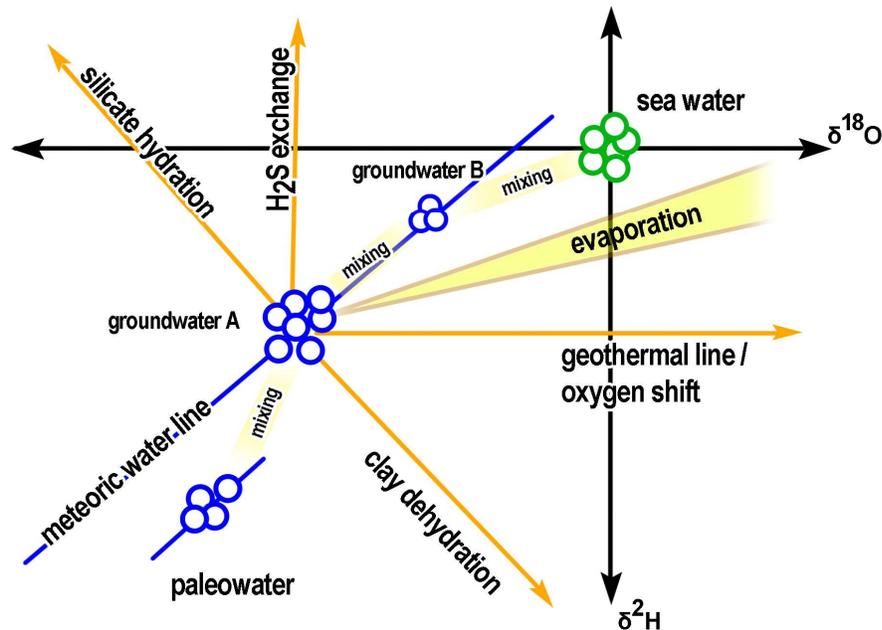
Sampel air sebanyak 20 mL dimasukkan ke dalam botol kedap udara dengan cara mendekatkan botol terhadap sumber air atau memasukkannya ke dalam sumber air. Gelembung udara dalam botol harus dihindari untuk mencegah evaporasi (Prasetyo dan Satrio, 2015).

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

Molekul air di alam tersusun atas isotop hidrogen ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) dan isotop oksigen ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ). Dari isotop-isotop tersebut, tiga molekul air yang mempunyai kelimpahan terbesar adalah:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , dan  $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  (Satrio dan Sidauruk, 2015). Karena molekul-molekul  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  dan  $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  memiliki kelimpahan yang sangat kecil jika dibandingkan dengan kelimpahan  $\text{H}_2\text{O}$ , maka kelimpahan isotop tersebut dinyatakan dalam kelimpahan relatif terhadap standar internasional *SMOW* (*Standard Mean Ocean Water*) seperti pada persamaan berikut (Satrio *et al.*, 2017):

$$\delta^2\text{H} = \frac{RH^{2\text{H}^{18}\text{O}}_{\text{sample}} - RH^{2\text{H}^{18}\text{O}}_{\text{SMOW}}}{RH^{2\text{H}^{18}\text{O}}_{\text{SMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{RH_2^{18}\text{O}_{\text{sample}} - RH_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}}{RH_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (2)$$



Gambar 2. Tipikal grafik  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$  untuk interpretasi proses yang terjadi dalam siklus hidrologi (modifikasi dari Geyh, 2000).

dimana  $RH^2HO_{sampel}$ ,  $RH_2^{18}O_{sampel}$  adalah kelimpahan molekul  $\text{H}^2\text{HO}$  dan  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  dari sampel;  $RH^2HO_{SMOW}$ ,  $RH_2^{18}O_{SMOW}$  adalah kelimpahan molekul  $\text{H}^2\text{HO}$  dan  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  dari standar *SMOW*;  $\delta^2\text{H}$  adalah kelimpahan  $^2\text{H}$  sampel (kelimpahan relatif molekul  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  dalam satuan ‰); dan  $\delta^{18}\text{O}$  adalah kelimpahan  $^{18}\text{O}$  sampel (kelimpahan relatif molekul  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  dalam satuan ‰)

Analisis komposisi isotop air dilakukan menggunakan piranti *Liquid Water Isotope Analyzer DLT-100* buatan Los Gatos Research USA (LGR). Prinsip kerja piranti tersebut adalah mengukur kelimpahan isotop berdasarkan perbandingan rasio isotop  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  atau  $^2\text{H}/^1\text{H}$  dalam sampel terhadap rasio isotop sampel standar yang digunakan, contoh standar tersebut telah terlebih dahulu diketahui nilai komposisi rasio isotopnya ( $\delta$ ), baik  $\delta(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$  maupun  $\delta(^2\text{H}/^1\text{H})$ . Hasil dari pengukuran komposisi rasio isotop tersebut dinyatakan dalam satuan permil (‰) (Sanusi *et al.*, 2018).

Keuntungan dari penggunaan isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  dibandingkan dengan perunut isotop lainnya yaitu komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  air hujan yang menunjukkan hubungan linier antara  $\delta^{18}\text{O}$

dan  $\delta^2\text{H}$  berupa garis meteorik global (*global meteoric water line*) (Delattre *et al.*, 2015). Air hujan atau air meteorik cenderung memiliki komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  yang lebih ringan (*depleted*) pada daerah lintang yang lebih tinggi (Prada *et al.*, 2016). Fenomena ini juga terjadi saat kedua isotop tersebut bergerak jauh ke dalam daratan. Dengan alasan ini, hasil plot kedua isotop menghasilkan kemiringan yang sedikit berbeda dan dikenal dengan garis meteorik lokal (Delattre *et al.*, 2015).

Selain itu, komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  sampel air dapat menunjukkan proses fisik yang dialami dalam siklus hidrologi seperti evaporasi, pencampuran, maupun interaksi air-batuan. Proses fisik tersebut dapat diidentifikasi lebih mudah dengan menggunakan bantuan plot  $\delta^{18}\text{O}$  terhadap  $\delta^2\text{H}$  (Gambar 2). Sebagai contoh, proses evaporasi permukaan membuat komposisi  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  menyimpang dari garis meteorik, membentuk garis yang lebih landai dengan *slope* sekitar 5. Sementara di daerah panas bumi dapat terjadi interaksi air-batuan pada temperatur tinggi mengakibatkan pengkayaan komposisi  $\delta^{18}\text{O}$  air (*oxygen shift*), namun komposisi  $\delta^2\text{H}$  relatif konstan karena mineral batuan sangat

Tabel 2. Hasil analisis isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  (‰) airtanah dan air panas dari beberapa lokasi daerah di Jawa Barat.

No.	Kode	Lokasi	Tipe	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Temp. (°C)
<i>Palimanan, Cirebon</i>						
1	PL01	Gunung Kromong	Mataair Panas	-3,17	-43,50	36,5
2	PL02	Pemandian	Mataair Panas	-1,77	-42,80	55,5
3	PL03	Pemandian	Air Sumur	-6,65	-46,10	29,0
<i>Cikundul dan Santa, Sukabumi</i>						
4	SK01	Cikundul	Mataair Panas	-5,28	-39,2	58,5
5	SK02	Santa	Mataair Panas	-6,89	-43,3	36,4
6	SK03	Santa	Mataair Hangat	-3,86	-25,6	30,3
<i>Gunung Pancar, Bogor</i>						
7	PC01	Kawah Merah	Mataair Panas	-4,85	-30,1	67,2
8	PC02	Kawah Hitam	Mataair Panas	-6,25	-35,9	53,4
9	PC03	Pancar-A	Mataair Panas	-4,85	-29,5	50,8
10	PC04	Pancar-B	Mataair Panas	-6,33	-36,5	44,9
11	PC05	Airtanah Pancar	Air Sumur	-5,68	-35,6	26,6
12	PC06	Sungai Cilaya	Air Sungai	-6,12	-37,0	27,7
<i>Gunung Gede, Cianjur</i>						
13	GD01	Green Apple	Mataair Panas	-9,54	-64,0	41,5
14	GD02	Istana Cipanas	Mataair Panas	-8,90	-60,0	36,4
15	GD03	Kandang Batu	Mataair Panas	-7,26	-55,0	50,1
16	GD04	Kandang Badak	Mataair Dingin	-10,8	-70,5	14,4
17	GD05	Kandang Batu	Air Sungai	-9,60	-62,0	14,4
18	GD06	Telaga Biru	Air Sungai	-8,50	-57,9	18,0
19	GD07	Kawah Wadon	Uap Panas	3,76	-24,1	170,2
20	GD08	Cipadani	Mataair Panas	-6,85	-52,4	42,5
<i>Ciseeng, Bogor</i>						
21	CS01	Ciseeng	Mataair Panas	-3,05	-32,10	41,2
22	CS02	Sawangan	Mataair Hangat	-4,08	-34,20	30,0
23	CS03	Ciseeng	Air Sumur	-5,98	-35,30	27,0

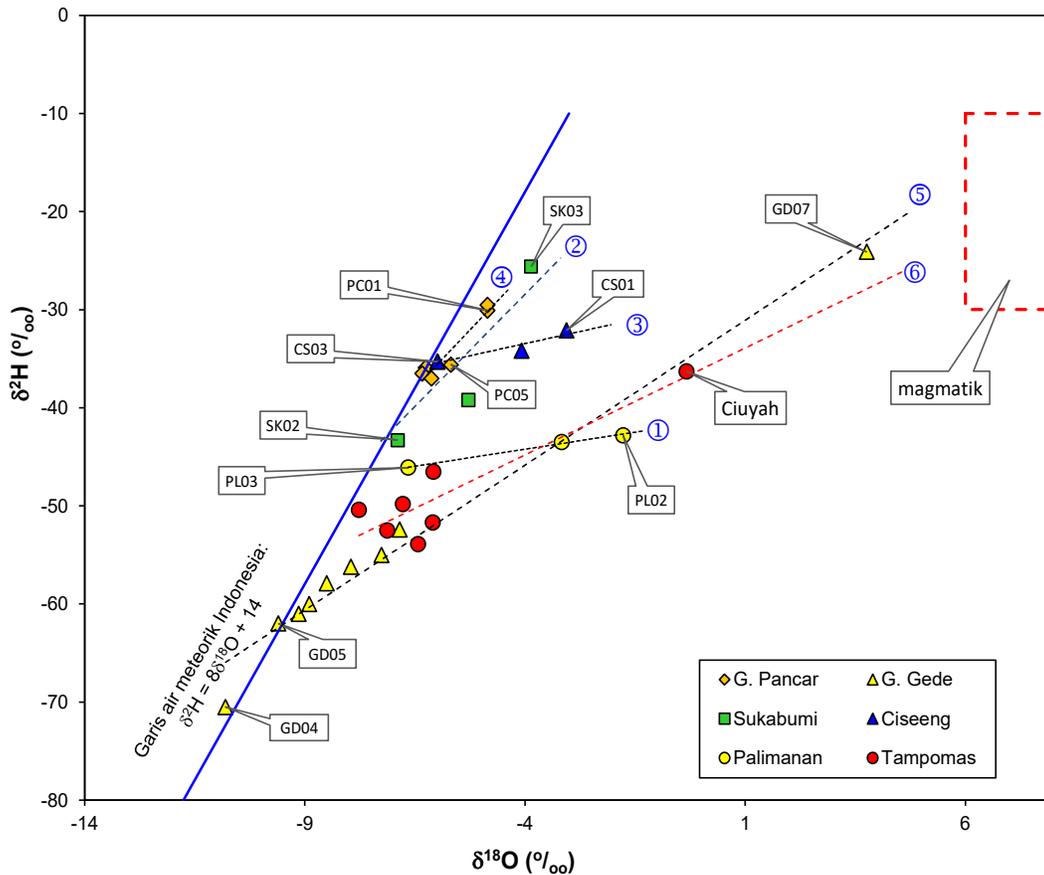
sedikit atau tidak mengandung H (Giggenbach, 1992). Demikian pula proses pencampuran (*mixing*) antara dua sumber air (*end members*) dapat ditunjukkan dengan jelas dalam grafik tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 memperlihatkan hasil analisis isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  dari sampel mataair panas yang diambil dari beberapa lokasi di Jawa Barat, meliputi mataair di daerah Palimanan, Cirebon; Cikundul dan Santa, Sukabumi; Gunung Pancar, Bogor; Gunung Gede, Bogor – Cianjur; dan Ciseeng,

Bogor. Dari tabel tersebut terlihat bahwa komposisi isotop bervariasi sesuai karakteristiknya masing-masing.

Pembahasan yang dilakukan meliputi 6 (enam lokasi) mataair panas di Jawa Barat. Enam lokasi tersebut adalah Palimanan, Cirebon; Cikundul dan Santa, Sukabumi; Ciseeng Bogor; Gunung Pancar, Bogor; Gunung Gede, Cianjur; dan Gunung Tampomas di Sumedang. Pembahasan menekankan pada genesa sumber air panas berdasarkan hasil dari seluruh data pengukuran yang telah dilakukan.



Gambar 3. Grafik  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$  mataair panas di daerah penelitian. (1) interaksi air-batuan karbonat di Palimanan (2) Garis evaporasi dengan *slope* 5,7 di Sukabumi (3) *oxygen shifting* akibat interaksi air-batuan karbonat di Ciseeng (4) Garis evaporasi dengan *slope* 4,7 di Gunung Pancar (5) Garis pencampuran dengan komponen air magmatik di Gunung Gede (6) Garis pencampuran dengan komponen magmatik (Giggenbach, 1992) di Gunung Tampomas (Prasetyo *et al.*, 2018).

### Palimanan, Cirebon

Air panas yang muncul di sekitar Gunung Kromong Palimanan memiliki komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  antara -3,17‰ hingga -1,77‰ dan  $\delta^2\text{H}$  antara -43,50‰ hingga -42,80‰. Jika dilihat nilai isotop  $\delta^{18}\text{O}$ , terlihat bahwa keduanya memiliki komposisi yang cukup berat (mengalami pengkayaan/*enriched*) mendekati komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  air laut Jawa sebesar -0.36 ‰ (Wijatna, *et al.*, 2017), mengindikasikan adanya pencampuran (*mixing*) antara airtanah dengan *connate water* yang terjadi pada batuan formasi yang terpanaskan oleh sistem panas bumi. Berdasarkan nilai  $\delta^2\text{H}$  yang relatif ringan, diperkirakan pencampuran tersebut terjadi pada

batuan formasi yang cukup dalam. Hal ini didukung dengan data daya hantar listrik dari kedua sumber air panas, sekitar 15000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , yang menunjukkan tipikal *deep circulation* (Shaoping, 1997). Namun demikian, grafik hubungan antara  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  (Gambar 3) menunjukkan bahwa kedua sumber air panas tersebut mengalami fenomena *oxygen-shifting*, yaitu interaksi antara oksigen dari air panas dengan oksigen dari batu gamping sehingga mataair panas tersebut menjadi bertipe bikarbonat (Herdianita *et al.*, 2010). Data geologi menunjukkan bahwa batu gamping yang ada di area tersebut berumur Miosen (Herdianita *et al.*, 2010).

### Cikundul dan Santa, Sukabumi

Grafik  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  air panas area Sukabumi (Gambar 3) menunjukkan bahwa mataair panas Santa berada dekat dengan garis air meteorik, mengindikasikan bahwa air panas yang muncul didominasi air meteoric. Sedangkan mataair hangat Santa (SK03) cenderung bertipikal evaporasi akibat pengaruh air permukaan di sekitarnya dan memiliki *slope* garis evaporasi sekitar 5 (Geyh, 2000). Sementara itu, mataair panas Cikundul (SK01) memiliki kecenderungan interaksi dengan air andesitik seperti yang ditunjukkan pada grafik  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  (Gambar 3), dengan kecenderungan mengarah ke *end member* magmatik Gunung Gede daripada ke arah evaporasi. Diperkirakan bahwa ketiga mataair panas tersebut berasal dari sistem panas bumi Gunung Gede, hanya saja interaksi dengan air meteorik terjadi pada batuan yang dangkal. Sementara itu, mataair hangat Santa dalam perjalanannya melalui batuan lebih dominan dipengaruhi air permukaan di sekitarnya yang menyebabkan penurunan temperatur secara signifikan.

### Ciseeng, Bogor

Komposisi  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  air meteorik di daerah Ciseeng paling berat dibandingkan sampel lainnya, mengindikasikan interaksi air-batuan yang terjadi pada formasi batuan yang lebih dangkal. Grafik  $\delta^2\text{H}$  terhadap  $\delta^{18}\text{O}$  menunjukkan bahwa air panas yang berasal dari sumber air panas area pemandian (CS01) mengalami pengkayaan oksigen atau *oxygen shift* (Gambar 2 dan Gambar 3), mengindikasikan bahwa air panas tersebut merupakan air meteorik yang mengalami interaksi dengan mineral batuan, seperti  $\text{CaCO}_3$  atau  $\text{SiO}_2$  (Abuharara, 2017). Dari data geologi menunjukkan bahwa mataair panas Ciseeng berasal dari sistem air panas klorida-bikarbonat sebagai *outflow* sistem panas bumi yang terjebak sepanjang struktur batuan dasar gamping dan batupasir gampingan berumur tersier (Akbar dan Sudihartono, 1994). Dengan demikian, pengkayaan terjadi sebagai akibat interaksi antara air meteorik dengan batugamping ( $\text{CaCO}_3$ ). Sementara itu, air hangat yang keluar di daerah Sawangan (CS02) memiliki nilai  $\delta^{18}\text{O}$  sebesar -4,08 ‰, berada diantara airtanah (CS03) dan mataair panas Ciseeng antara -5,98‰ dan -3,05‰, mengindikasikan bahwa mataair hangat Sawangan merupakan hasil pencampuran antara

keduanya. Berdasarkan data geologi, terdapat patahan berarah utara selatan antara Ciseeng dan Sawangan (Turkandi *et al.*, 1992), sehingga menguatkan dugaan bahwa mataair yang muncul di Sawangan memiliki hubungan dengan air panas Ciseeng, hanya lebih didominasi oleh air meteorik dari sekitarnya.

### Gunung Pancar, Bogor

Komposisi  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  air panas dari daerah Gunung Pancar relatif berat dibandingkan dengan air panas Sukabumi, Ciseeng, maupun gunung Gede. Air panas Kawah Merah (PC01) dan Gunung Pancar-A (PC03) memiliki nilai  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  yang relatif sama dan memiliki kecenderungan adanya pengaruh evaporasi atau adanya pengaruh air permukaan pada kedua sumber air panas tersebut (Satrio dan Pujiindiyati, 2017). Sebaliknya air panas Kawah Hitam (PC02) dan Gunung Pancar-B (PC04) memiliki nilai  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  yang relatif sama, namun lebih ringan (*depleted*) dibandingkan dengan air panas Kawah Merah dan Gunung Pancar-A. Karakteristik air panas Kawah Hitam (53,4 °C) dan Gunung Pancar-B (44,9 °C) berada pada garis meteorik yang mengindikasikan bahwa meskipun air hujan telah masuk dalam sistem panas bumi, namun tetap memiliki komposisi isotop yang relatif sama tanpa pengaruh signifikan dari batuan yang dilaluinya ataupun pengaruh airtanah lokal. Di daerah Gunung Pancar-B, pengaruh tersebut lebih dominan dibandingkan dengan Kawah Hitam, yaitu dilihat dari temperturnya yang lebih rendah. Pengaruh airtanah lokal tersebut juga terlihat dari kandungan Mg yang tinggi di kedua lokasi tersebut (Deandra dan Hendrasto, 2018). Sementara itu, air sungai Cilya (PC06) lebih banyak dipengaruhi proses evaporasi permukaan.

### Gunung Gede, Cianjur

Nilai  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  airtanah area Gunung Gede secara umum adalah yang paling ringan di antara mataair panas atau airtanah lainnya di daerah penelitian. Beberapa mataair panas menunjukkan indikasi adanya interaksi dengan sistem panas bumi yang berasal dari pemanasan batuan oleh intrusi magma Gunung Gede. Berdasarkan garis pencampuran airtanah dengan air magmatik (Gambar 3), terlihat bahwa air yang keluar sebagai mataair panas didominasi airtanah yang berasal dari area resapan Gunung Gede. Dari

grafik terlihat bahwa air panas *Green Apple* (GD01) dan Sungai Kandang Batu (GD05) memiliki komposisi isotop yang relatif sama dan dalam grafik  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$  (Gambar 3) terletak pada garis meteorik. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua airtanah tersebut berasal dari area resapan yang relatif sama. Sementara itu, mataair panas Istana Cipanas (GD02) dengan temperatur  $36^\circ\text{C}$ , meskipun berada dalam garis pencampuran airtanah dan air magmatik (Giggenbach, 1992) namun lebih dekat dengan garis meteorik. Hal ini mengindikasikan bahwa air panas yang keluar di Istana Cipanas lebih didominasi airtanah dan hanya memiliki proporsi air magmatik kurang dari 7%. Mataair panas Cipadani (GD08), meskipun temperatur relatif rendah yaitu  $43^\circ\text{C}$ , namun mendapat pengaruh sistem panas bumi paling besar dibanding mataair panas lainnya. Air panas Kandang Batu (GD03) juga mendapat pengaruh dari sistem panas bumi Gunung Gede, namun lebih kecil dari mataair panas Cipadani. Sungai Cilebak merupakan airtanah yang mengalami proses evaporasi, sementara itu air sungai Telaga Biru (GD06) masih mencerminkan airtanah yang berasal dari air meteorik.

Fraksi air magmatik (Giggenbach, 1992) yang bercampur dengan airtanah dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Porowski, 2014).

$$(\delta^{18}\text{O})_{gw} = X (\delta^{18}\text{O})_{mw} + (1 - X) (\delta^{18}\text{O})_{rw} \quad (3)$$

dimana notasi X adalah fraksi air magmatik,  $(\delta^{18}\text{O})_{gw}$  adalah nilai  $\delta^{18}\text{O}$  air sampel (‰),  $(\delta^{18}\text{O})_{mw}$  adalah nilai  $\delta^{18}\text{O}$  air magmatik, sebagai *end member* (‰) dan  $(\delta^{18}\text{O})_{rw}$  adalah nilai  $\delta^{18}\text{O}$  air meteorik (‰).

Berdasarkan persamaan tersebut, terlihat bahwa fraksi air magmatik yang terdapat dalam sampel mataair panas daerah Gunung Gede bervariasi antara 3% di air panas Istana Cipanas hingga 21% di air panas Cipadani (Tabel 2). Dari data tersebut terlihat bahwa air panas yang muncul di area Gunung Gede lebih didominasi oleh air meteorik dibandingkan air magmatik.

### Gunung Tampomas, Sumedang

Sebagai pembanding (Gambar 3) ditampilkan plot  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  dari mataair panas sekitar Gunung Tampomas (Prasetio *et al.*, 2018). Secara umum komposisi isotop area Gunung Tampomas lebih berat dibandingkan area Gunung Gede. Dari grafik

$\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  sebagian besar mataair panas berada dekat dengan garis meteorik yang mengindikasikan sumber air panas di area Gunung Tampomas berasal dari air meteorik. Namun demikian, terjadi pergeseran komposisi isotop  $\delta^{18}\text{O}$  atau fenomena *oxygen shift* yang menunjukkan adanya interaksi antara fluida dengan batuan pada temperatur tinggi (Prasetio *et al.*, 2018). Terdapat satu sampel (Ciuyah) yang terletak menjauhi garis meteorik, mengindikasikan kemungkinan adanya (1) proses evaporasi atau (2) pencampuran dengan air magmatik maupun air laut. Indikasi yang pertama kecil kemungkinannya mengingat *slope* garis tersebut hanya sekitar 2,18 (Gambar 3) jauh lebih rendah dari tipikal garis evaporasi dengan nilai *slope* berkisar 5. Selain itu, pengambilan sampel juga dilakukan di bawah permukaan pada *outlet* mataair sehingga dipastikan tidak ada proses evaporasi permukaan. Sementara untuk indikasi yang kedua lebih memungkinkan mengingat komposisi kimia air Ciuyah yang merupakan tipe klorida dengan konsentrasi Cl mencapai 10.000 mg/L dengan pH mendekati netral (Prasetio *et al.*, 2018), hal ini menunjukkan kemungkinan adanya pencampuran dengan sedikit komponen magmatik maupun air laut.

### KESIMPULAN

Penelitian mengenai karakteristik isotop mataair panas dapat mengungkap asal-usul air tersebut dalam sistem panas bumi. Dari hasil evaluasi dapat disimpulkan bahwa mataair panas di daerah penelitian didominasi dari sumber air meteorik (hujan) dengan evolusi yang berbeda-beda. Pada mataair panas Gunung Gede, terdapat pencampuran dengan air magmatik dengan fraksi 3 hingga 21%, sedangkan di daerah Sukabumi hanya di Cikundul yang terindikasi berinteraksi dengan air magmatik. Untuk mataair panas Gunung Pancar tidak menunjukkan interaksi air-batuan yang signifikan, sementara mataair panas Palimanan dan Ciseeng diperkirakan mengalami interaksi dengan batuan karbonat.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada para mahasiswa tugas akhir dan para analis di lab Hidrologi PAIR-BATAN yang telah membantu dalam pengambilan dan analisis sampel.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abuharara, A., 2017. Using isotopes to understand the origin of water and the effect of reinjection in the Los Azufres Geothermal Field in Mexico. Thesis, University of Waterloo, Canada, pp. 1-168.
- Akbar N., Sudihartono K., 1994. Geologi daerah air panas Ciseeng Kecamatan Parung, Kabupaten Bogor. Laporan Direktorat Vulkanologi, Departemen Pertambangan dan Energi.
- Bogie, I., Kusumah, I.Y., Wisnandary, M.C., 2008. Overview of the Wayang Windu geothermal field, West Java, Indonesia. *Geothermics* 37, 347 - 365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.03.004>
- Deandra, R., Hendrasto, F., 2018. The estimation of potential heat loss based on thermal geochemical data in the Mount Pancar, Bogor, West Java Province. IOP conf. Series: Earth and Environmental Science 212. DOI: 10.1088/1755-1315/212/1/012053
- Delattre, H., Vallet-Coulomb, C., Sonzogni, C., 2015. Deuterium excess in the atmospheric water vapor of a Mediterranean coastal wetland: Regional vs. local signatures. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15, 10167–10181. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10167-2015>
- Djuri, 1995. Peta Geologi Lembar Arjawinangun, Jawa, skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Effendi, A.C., Kusnama, Hermanto, B., 1998. Peta Geologi Lembar Bogor, Jawa, skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- ESDM, K., 2017. Potensi Panasbumi Indonesia Jilid I. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Geyh, M., 2000. Groundwater. Saturated and unsaturated zone. In: Mook, W. G. (ed). *Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications. Technical Documents in Hydrology*, Vol 4. No 39. UNESCO, Paris.
- Giggenbach, W.F., 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 113, 495–510
- Hamed, Y., 2014. Stable isotope ratios in meteoric waters in El Kef Region, Northwestern Tunisia: Implications for changes of moisture sources. *Journal of Earth Science and Climate Change* 05, 1–6. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000203>
- Herdianita, R.N., Julinawati, T., Edria Amorita, I., 2010. Hydrogeochemistry of thermal water from surface manifestation at Gunung Ciremai and its surrounding, Cirebon, West Java - Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010.
- Herdianita, R.N., Situmorang, J., Mussofan, W., Hamzah, I., 2012. Geothermal resources of Java. In: Huddleston-Holmes. C. and Gerner. E. (eds.) 2012. *Proceedings of the 2012 Australian Geothermal Energy Conference. Record 2012/73*. Geoscience Australia: Canberra.
- Mary, R.T., Armawi, A., Hadna, A.H., Pitoyo, A.J., 2017. Panas bumi sebagai harta karun untuk menuju ketahanan energi. *Jurnal Ketahanan Nasional*. 23, 93–113. <https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.22146/jkn.26944>
- Meng, Y., Liu, G., Li, M., 2015. Tracing the sources and processes of groundwater in an alpine glacierized region in Southwest China: Evidence from environmental isotopes. *Water* 7, 2673–2690. <https://doi.org/10.3390/w7062673>
- Olivier, J., Venter, J., Jonker, C.S., 2011. Thermal and chemical characteristics of hot water springs in the northern part of the Limpopo province, South Africa. *Water SA* 37, 427–436. <https://doi.org/10.4314/wsa.v37i4.1>
- Porowski, A., 2014. Isotope hydrogeology. In: Eslamian, S. (ed), *Handbook of Engineering Hydrology*. Vol. 1: Fundamentals and Applications, 1<sup>st</sup> edition, CRC Press. 345–378. <https://doi.org/10.1201/b15625>
- Prada, S., Cruz, J.V., Figueira, C., 2016. Using stable isotopes to characterize groundwater recharge sources in the volcanic island of Madeira, Portugal. *Journal of Hydrology*.

- 536, 409–425.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2016.03.009>
- Prasetyo, R., Laksmiingpuri, N., Satrio, S., 2018. Karakteristik kimia dan isotop fluida panas bumi daerah Gunung Tampomas, Jawa Barat. *Riset Geologi dan Pertambangan* 28, 1-11.  
<https://doi.org/10.14203/risetgeotam2018.v28.508>
- Prasetyo, R., dan Satrio, 2015. Aplikasi teknik isotop alam  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  untuk studi airtanah pada cekungan airtanah Semarang, Jawa Tengah. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, 9 - 10 Juni 2015, 46–51.
- Sanusi, N.L., Nurfadhlini, N., Satrio, S., 2018. Studi karakteristik airtanah di Kawasan Nuklir Pasar Jumat (KNPJ) dengan metode hidrokimia dan isotop alam. *Eksplorium* 39, 51-58.  
<https://doi.org/10.17146/eksplorium.2018.39.1.4100>
- Satrio, Pujiindiyati, E.R., 2017. Karakteristik airtanah akuifer dalam sekitar Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Bantar Gebang-Bekasi, Jawa Barat. *Jurnal Teknologi Lingkungan* 18, 96–103.
- Satrio dan Sidauruk, P., 2015. Studi daerah imbuhan sistem air sungai bawah tanah Gunungkidul — Yogyakarta menggunakan isotop stabil  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$ . *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi* 11, 87–98.
- Satrio, S., Hendarmawan, H., Dwi Hadian, M.S., Pujiindiyati, E.R., 2015. Karakteristik airtanah dangkal kota Semarang pada musim penghujan berdasarkan pendekatan isotop stabil ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) dan kimia air. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi* 11, 73–86.  
<https://doi.org/10.17146/jair.2015.11.1.2701>
- Satrio, S., Pratikno, B., Sidauruk, P., 2017. Studi karakteristik airtanah daerah Nganjuk, Jawa Timur dengan isotop alam. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi* 12, 89.  
<https://doi.org/10.17146/jair.2016.12.2.3545>
- Shaoping, D., 1997. Geochemical interpretation of thermal fluid from the Yangyi high-temperature field, China. *Reports 1997, Geothermal Training Program, Orkustofnun, Grensasvegur, Reykjavik, Iceland*, 113–135.
- Stimac, J., Nordquist, G., Suminar, A., Sirad-Azwar, L., 2008. An overview of the Awibengkok geothermal system, Indonesia. *Geothermics* 37, 300 - 331. DOI: 10.1016/j.geothermics.2008.04.004.
- Suryadarma, Azimuddin, T., Dwikorianto, T., Fauzi, A., 2005. The Kamojang Geothermal Field: 25 years operation. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*.
- Turkandi, T., Sidarto, Agustiyanto, D.A., Hadiwidjojo, M.P., 1992. Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Jawa, skala 1:1.000.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Wijatna, A.B., Kayyis, M., Satrio, and Pujiindiyati, E.R., 2017. Study of seawater intrusion in deep aquifers of Semarang coast using natural isotopes and hydrochemicals. *Indonesian Journal on Geoscience* 6, 17 - 28.  
<https://doi.org/10.17014/ijog.4.2.159-167>

