

KARAKTERISTIK KIMIA DAN ISOTOP FLUIDA PANAS BUMI DAERAH GUNUNG TAMPOMAS, JAWA BARAT

CHEMICAL AND ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF GEOTHERMAL FLUIDS OF MOUNT TAMPOMAS, WEST JAVA

Rasi Prasetyo, Neneng Laksminingpuri, Satrio

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya no. 49 Jakarta Selatan

ABSTRAK Gunung Tampomas merupakan salah satu daerah di Jawa Barat yang memiliki manifestasi panas bumi berupa mata air panas di sekitarnya. Penelitian potensi dan karakterisasi reservoir panas bumi Gunung Tampomas telah dilakukan dengan menggunakan metode kimia serta isotop alam ^{18}O dan ^2H (deuterium) dari mata air panas dan dingin di sekitar Gunung Tampomas dengan temperatur mata air berkisar antara 20°C hingga 50°C . Interpretasi hasil analisis tersebut dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik reservoir seperti asal-usul fluida, temperatur reservoir dan evolusi fluida. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian mata air panas Gunung Tampomas yaitu Ciseupan dan Ciuyah memiliki kandungan klorida tinggi yang mengindikasikan fluida berasal dari reservoir panas bumi. Sementara berdasarkan perhitungan geotermometer daerah panas bumi Gunung Tampomas memiliki potensi panas bumi yang tergolong medium entalpi dengan temperatur berkisar $120\text{-}220^\circ\text{C}$. Fluida panas bumi berasal dari air meteorik dengan sedikit pencampuran dengan air magmatik. Berdasarkan data geokimia,

reservoir Gunung Tampomas diperkirakan memiliki reservoir yang terletak cukup dalam.

Kata kunci: Gunung Tampomas, panas bumi, reservoir, metode kimia, metode isotop.

ABSTRACT Mount Tampomas is one of many areas in West Java that has several geothermal manifestations. A study about geothermal potential and reservoir has been done using chemistry and natural isotopes methods taken from hot springs and cold springs around Mount Tampomas with temperature range from 20°C to 50°C . The interpretation of analysis results was aimed for reservoir characterization, such as fluid origin, reservoir temperature and conceptual model of Mount Tampomas reservoir. Analysis result shows that some of hot springs (Ciseupan and Ciuyah) have high chloride content that indicates the fluids are reservoir origin. While based on geotermometer calculation, Mount Tampomas has geothermal potential with temperature range 120°C to 220°C , categorized as medium enthalpy. The geothermal fluids are meteoric origin and slightly mixed with magmatic waters. Based on geochemical evidence, the reservoir of Mount Tampomas is estimated deep seated.

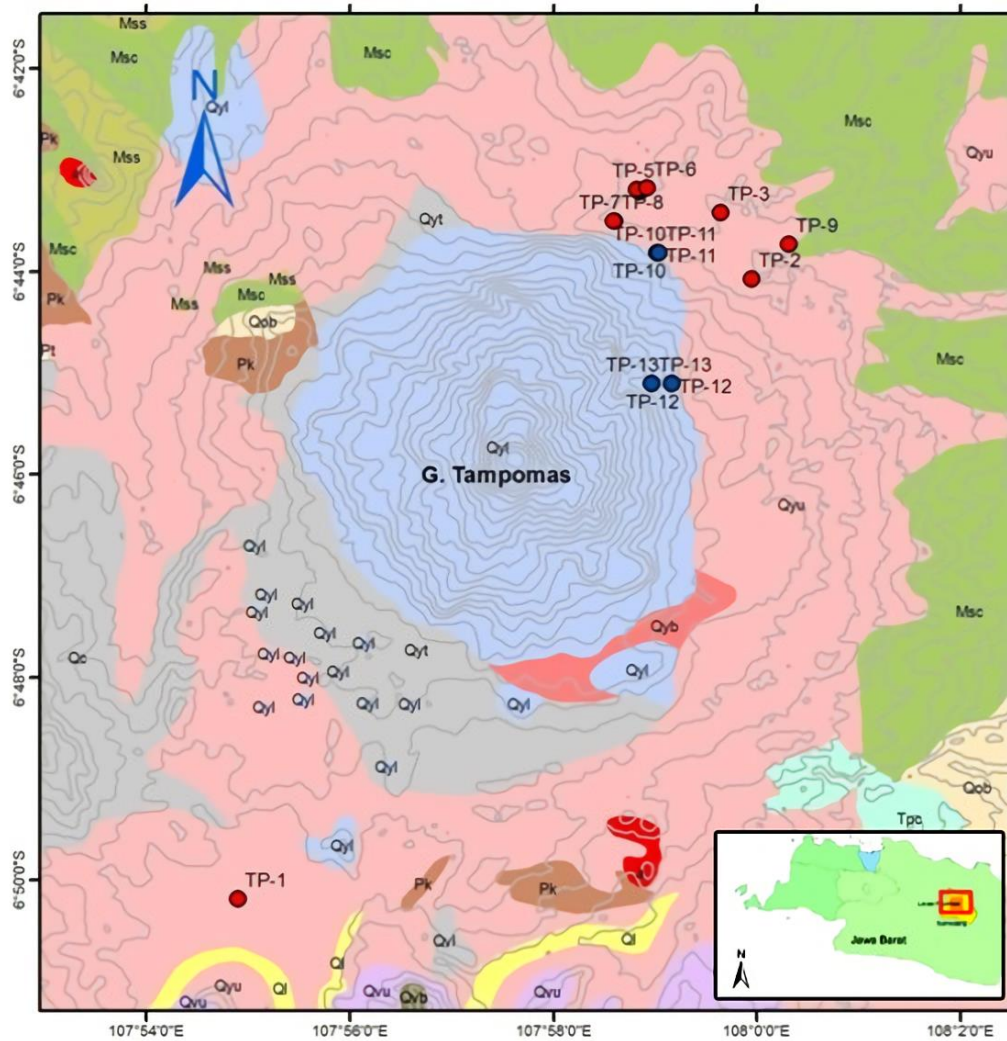
Keywords: Mount Tampomas, geothermal, reservoir, chemistry method, isotopes method.

Naskah masuk : 11 Oktober 2017
Naskah direvisi : 12 Desember 2017
Naskah diterima : 16 April 2018

Rasi Prasetyo
Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya no. 49 Jakarta Selatan
Email : rasi_p@batan.go.id

PENDAHULUAN

Indonesia yang terletak dalam cincin api dunia dengan banyaknya Gunung api disamping memberikan dampak yang berbahaya juga memberikan anugerah akan tersedianya energi yang ramah lingkungan yaitu panas bumi. Potensi



Gambar 1. Geologi Gunung Tampomas, Jawa Barat (Djuri, 1995; Silitonga, 1973), beserta lokasi pengambilan sampel (merah = mata air panas, biru = mata air dingin).

energi panas bumi yang dimiliki oleh Indonesia mencapai sekitar 28,500 MW dengan potensi sumberdaya 11,073 MW dan cadangan 17,506 MW tersebar di 331 lokasi di seluruh Indonesia (Kementerian ESDM, 2017). Sebesar 4,6% atau 1,346 MW dari potensi tersebut telah dimanfaatkan untuk pembangkitan tenaga listrik dengan kapasitas terpasang terbesar berada di daerah Jawa Barat yaitu sebesar 1064 MW, kemudian diikuti oleh Lampung 110 MW, Sulawesi Utara 80 MW Jawa Tengah 60 MW, Sumatera Utara 12 MW dan Nusa Tenggara 7,5 MW (Darma and Gunawan, 2015).

Upaya eksplorasi energi panas bumi hingga saat ini terus ditingkatkan untuk mencapai target pembangkitan listrik. Salah satu daerah yang memiliki prospek panas bumi adalah Gunung

Tampomas yang terletak di Kabupaten Sumedang (Gambar 1).

Dalam penelitian ini pengambilan sampel fluida panas bumi dari berbagai mata air panas di sekitar Gunung Tampomas diambil untuk mengetahui karakteristik reservoir panas bumi seperti temperatur bawah permukaan, tipe dan evolusi fluida melalui komposisi kimia dan isotop alam dari mata air panas dan dingin.

LOKASI DAN GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Gunung Tampomas digolongkan sebagai gunung yang tidak aktif yang secara geologis terletak pada busur Sunda bagian Jawa Barat. Produk gunung api Tampomas secara umum berumur Kuartar awal sampai Kuartar akhir. Formasi stratigrafi di

Tabel 1. Koordinat lokasi pengambilan sampel beserta parameter fisik.

No.	Kode	Lokasi	Elevasi (m)	Koordinat	T (°C)	pH	TDS (ppt)	Cond. (mS)
1	TP-1	Ciseupan	498	S 06°50'11,0" E 107°54'53,4"	39,2	7,28	2,87	5,74
2	TP-2	Cipanas	342	S 06°44'04,4" E 107°59'56,5"	50,5	6,36	0,84	1,65
3	TP-3	Bojong Cibubuan	308	S 06°43'24,9" E 107°59'38,3"	27,4	7,54	0,18	0,37
4	TP-4	Ciledre	292	S 06°43'12,5" E 107°58'50,6"	37,7	6,04	0,62	1,24
5	TP-5	Ciledre	297	S 06°43'11,3" E 107°58'49,0"	38,4	6,97	0,79	1,59
6	TP-6	Ciaseum	309	S 06°43'10,5" E 107°58'55,0"	28,0	5,6	0,18	0,30
7	TP-7	Cileungsing	308	S 06°43'29,9" E 107°58'35,7"	45,8	6,33	1,36	2,73
8	TP-8	Cileungsing	307	S 06°43'29,9" E 107°58'35,5"	47,2	6,41	1,47	3,00
9	TP-9	Ciuyah	332	S 06°43'43,7" E 108°00'18,6"	38,9	6,32	>10	>20
10	TP-10	Cigirang	389	S 06°43'48,9" E 107°59'01,1"	24,1	6,97	0,06	0,12
11	TP-11	Cigirang	386	S 06°43'49,0" E 107°59'01,4"	24,1	6,97	0,06	0,12
12	TP-12	Curug Ciputrawangi	662	S 06°45'05,9" E 107°58'57,8"	20,5	6,97	0,04	0,09

sekitar lokasi Gunung Tampomas (Gambar 1) yaitu Formasi Subang, terdiri dari batuan pasir (Mss) dan lempung (Msc) berumur Miosen, Formasi Kaliwangu (Pk) yang berumur Miosen-Plistosen, Formasi Citalang (Pt) yang berumur Plistosen. Produk Gunung api Tampomas yang berupa breksi (Qvb) terletak di sebelah barat Tampomas (tidak tampak pada Gambar), sementara produk vulkanik berupa tuf batu apung (Qyt) dan breksi aglomerat (Qyb) berumur Kuartar tersebar mengelilingi Gunung Tampomas dari sisi barat laut - barat - baratdaya - selatan - tenggara. Gunung Tampomas sendiri dilingkupi oleh satuan tak diuraikan (Qyl) aliran lava muda bersifat basaltik yang berumur Kuartar. Intrusi (terobosan) lava andesit (A) juga teramati di bagian selatan dan barat laut (Djuri, 1995; Silitonga, 1973).

METODE

Pengambilan sampel mata air

Pengambilan sampel mata air panas dilakukan dengan pencidukan biasa, tetapi tepat pada lubang

keluaran mata air. Untuk sampel isotop ^{18}O dan ^2H digunakan botol sampel 20 mL yang harus terisi penuh sampel tanpa ada gelembung udara untuk meminimalisir fraksinasi isotop. Untuk sampel kation dilakukan penambahan asam hingga pH 2–3, untuk mencegah pengendapan dan polimerisasi silika, sedangkan untuk sampel anion tidak diperlukan perlakuan khusus (Arnórsson et al., 2006; Clark and Fritz, 1997).

Analisis sampel

Semua analisis isotop dan kima dilakukan di laboratorium Hidrologi dan Panas bumi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi–BATAN. Analisis kimia meliputi kation dan anion dilakukan dengan menggunakan beberapa metode. Metode titrasi asam-basa digunakan untuk analisis HCO_3^- dengan titran HCl. Metode ion kromatografi digunakan untuk analisis anion Cl^- , SO_4^{2-} , F^- dan kation (Li^+ , Na^+ , Mg^{2+} dan Ca^{2+}) (D4327-11, 2011; D859-16, 2009). Sementara analisis silika menggunakan metode spektrofotometri dengan reagen amonium molibdat (D859-16, 2016).

Tabel 2. Hasil analisis kimia sampel air (dalam satuan mg/L).

No.	Kode	Lokasi	K	Na	Ca	Mg	Li
1	TP-1	Ciseupan	78,9	946,8	105,0	52,3	0,1
2	TP-2	Cipanas	17,9	206,9	57,1	53,5	0,3
3	TP-3	Bojong Cibubuan	2,4	28,3	27,8	16,1	0,0
4	TP-4	Ciledre-1	12,2	236,4	43,8	28,2	0,5
5	TP-5	Ciledre-2	10,9	217,2	49,7	26,9	0,5
6	TP-7	Cileungsing-1	24,9	450,6	69,2	45,8	0,9
7	TP-8	Cileungsing-2	24,8	456,4	75,3	49,3	0,9
8	TP-9	Ciuyah	142,0	6387,5	509,5	164,0	-
9	TP-10	Cigirang -1	2,6	6,6	15,7	3,7	-
10	TP-11	Cigirang -2	2,6	5,8	15,1	6,1	-
11	TP-12	Ciputrawangi-1	2,3	4,4	10,5	10,2	-
12	TP-13	Ciputrawangi-2	2,2	4,4	11,1	3,1	-

No.	Kode	Lokasi	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	SiO ₂
1	TP-1	Ciseupan	1790,2	0,0	297,0	16,2	8,9
2	TP-2	Cipanas	271,6	0,0	491,3	3,6	38,4
3	TP-3	Bojong Cibubuan	28,2	29,3	142,3	0,4	15,4
4	TP-4	Ciledre-1	270,8	48,7	326,7	2,4	37,0
5	TP-5	Ciledre-2	295,2	0,0	321,8	2,0	11,3
6	TP-7	Cileungsing-1	595,4	42,9	463,2	3,2	20,1
7	TP-8	Cileungsing-2	732,7	0,0	500,4	3,6	43,5
8	TP-9	Ciuyah	10625,2	0,0	855,3	49,7	8,3
9	TP-10	Cigirang -1	6,2	6,1	61,2	0,2	19,6
10	TP-11	Cigirang -2	6,2	4,8	70,3	0,1	13,6
11	TP-12	Ciputrawangi-1	6,2	14,4	59,6	0,1	2,4
12	TP-13	Ciputrawangi-2	16,0	1,0	31,6	0,1	17,3

Analisis isotop ^{18}O dan ^2H dilakukan dengan metode spektroskopi laser menggunakan alat *Liquid Water Isotope Analyser*. Analisis dilakukan dengan menggunakan 3 buah standar kerja dengan nilai komposisi isotop ^{18}O dan ^2H yang mewakili rentang komposisi isotop sampel air sehingga hasil analisis terjamin validitasnya (Aggarwal et al., 2009).

Hasil perhitungan analisis isotop ^{18}O dan ^2H mengacu kepada standar internasional SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) yang memiliki nilai ^{18}O dan ^2H sebesar 0 ‰ secara definitif (Aggarwal et al., 2009; Clark and Fritz, 1997). Hasil perhitungan analisis rasio isotop $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dan $^2\text{H}/^1\text{H}$ dinyatakan dalam rasio relatif delta (δ)

dengan satuan permil melalui persamaan sebagai berikut (Cumming, 2016; Vespasiano et al., 2014):

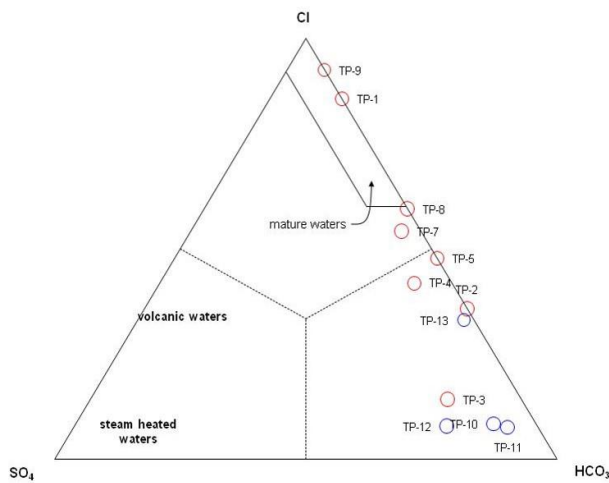
$$\delta = \frac{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{sample}}}{\left[\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{standar}}} \times 1000 \text{ ‰}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

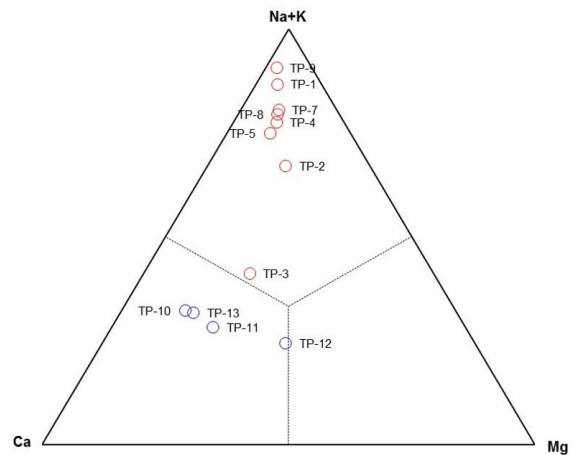
Peta pada Gambar 1 memperlihatkan lokasi studi dan pengambilan sampel di sekitar Gunung Tampomas. Lokasi sampel berupa mata air panas dan mata air dingin tersebar pada ketinggian antara 290 m hingga 500 m di atas permukaan laut

Tabel 3. Hasil analisis isotop (dalam satuan ‰).

No.	Kode	Lokasi	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
1	TP-1	Ciseupan	-6,08	-46,5
2	TP-2	Cipanas	-6,09	-51,7
3	TP-4	Ciledre	-6,43	-53,9
4	TP-5	Ciledre	-7,13	-52,5
5	TP-7	Cileungsing	-7,77	-50,4
6	TP-8	Cileungsing	-6,77	-49,8
7	TP-9	Ciuyah	-0,33	-36,3



Gambar 2. Diagram trilinear Cl-SO₄-HCO₃. Lingkaran merah = mata air panas, lingkaran biru = mata air dingin.



Gambar 3. Diagram trilinear (Na+K)-Ca-Mg. Lingkaran merah = mata air panas, lingkaran biru = mata air dingin.

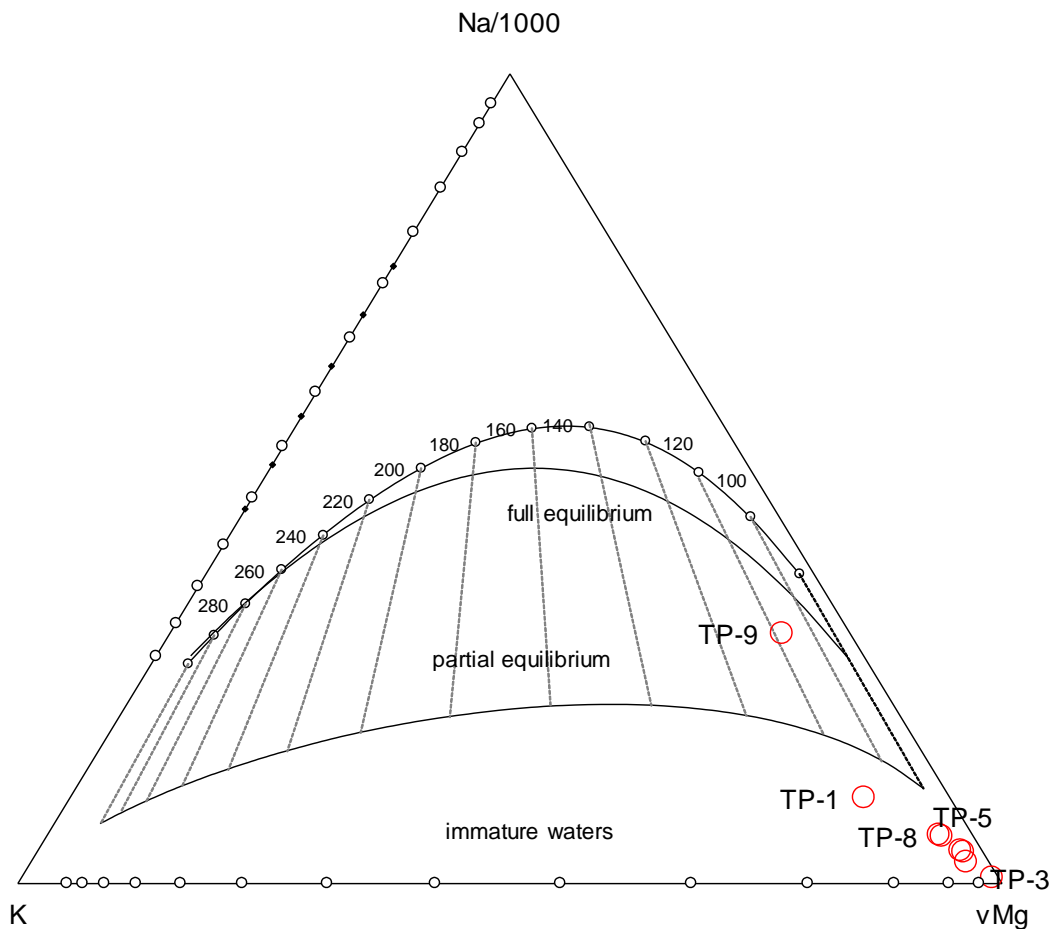
dan letak kemunculannya didominasi di lereng sebelah timur laut. Hanya ada satu mata air panas yang muncul di sebelah baratdaya dari Gunung Tampomas, yaitu mata air panas Ciseupan (TP-1).

Data dan parameter fisik dari lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Tabel 1. Temperatur mata air panas dan hangat berkisar antara 27°C (Cibubuan) hingga 50°C (Cipanas), sementara mata air dingin memiliki temperatur sekitar 20°C (Ciputrawangi) hingga 24°C (Cigirang) dengan temperatur udara sekitar berkisar antara 25°C – 27°C. Keseluruhan sampel air memiliki pH yang relatif netral berkisar 6 hingga 7,5 dengan TDS (*Total Dissolved Solids*) dari yang paling rendah pada mata air dingin yaitu berkisar 40 ppm hingga 840 ppm kecuali pada tiga mata air panas yang memiliki nilai TDS relatif tinggi berkisar antara 1300 ppm hingga 18000 ppm, yaitu pada mata air panas Ciseupan (TP-1), Cileungsing (TP-7, TP-8) dan Ciuyah (TP-9).

Keseluruhan hasil analisis kimia dapat dilihat dalam Tabel 2. Hasil analisis tersebut terlihat baik berdasarkan parameter *charge balance* yang berada di bawah 5% (Reed and Mariner, 1991). Secara umum, kandungan kimia sampel mata air panas lebih besar daripada mata air dingin, terutama komposisi kation dan klorida. Sementara hasil analisis isotop alam (Tabel 3) menunjukkan rentang komposisi isotop sampel berkisar -7,77‰ hingga -0,33‰ untuk $\delta^{18}\text{O}$ dan -53,9‰ hingga -36,33‰ untuk $\delta^2\text{H}$.

Kimia air dan geotermometri

Gambar 2 dan 3 menunjukkan diagram trilinear yang menunjukkan klasifikasi air berdasarkan komposisi anion utamanya yaitu Cl⁻, SO₄²⁻ dan HCO₃⁻ (Giggenbach, 1988) maupun kation utama yaitu Na+K, Ca dan Mg (Vespasiano et al., 2014). Dari diagram tersebut terlihat bahwa mata air panas terbagi atas tiga kelompok yaitu:



Gambar 4. Diagram trilinear geotermometer Na-K- $\sqrt{\text{Mg}}$, menunjukkan sebagian besar tergolong fluida *immature*.

Kelompok Na-Cl. Dua mata air panas yaitu Ciseupan (TP-1) dan Ciuyah (TP-9) dengan TDS tinggi dan pH netral termasuk tipe fluida Na-Cl yang merupakan tipikal air yang bersirkulasi di kedalaman pada temperatur tinggi (*mature water*). Tingginya kandungan TDS terutama ion Na dan Cl merupakan hasil dari netralisasi gas-gas asam yang dilepas magma dengan batuan sekitar (Giggenbach, 1988). Karena morfologi daerah pegunungan, fluida Na-Cl biasa ditemukan di lereng atau kaki gunung, jauh dari daerah *upflow* panas bumi (Cumming, 2016) sebagaimana lokasi mata air panas Ciseupan dan Ciuyah.

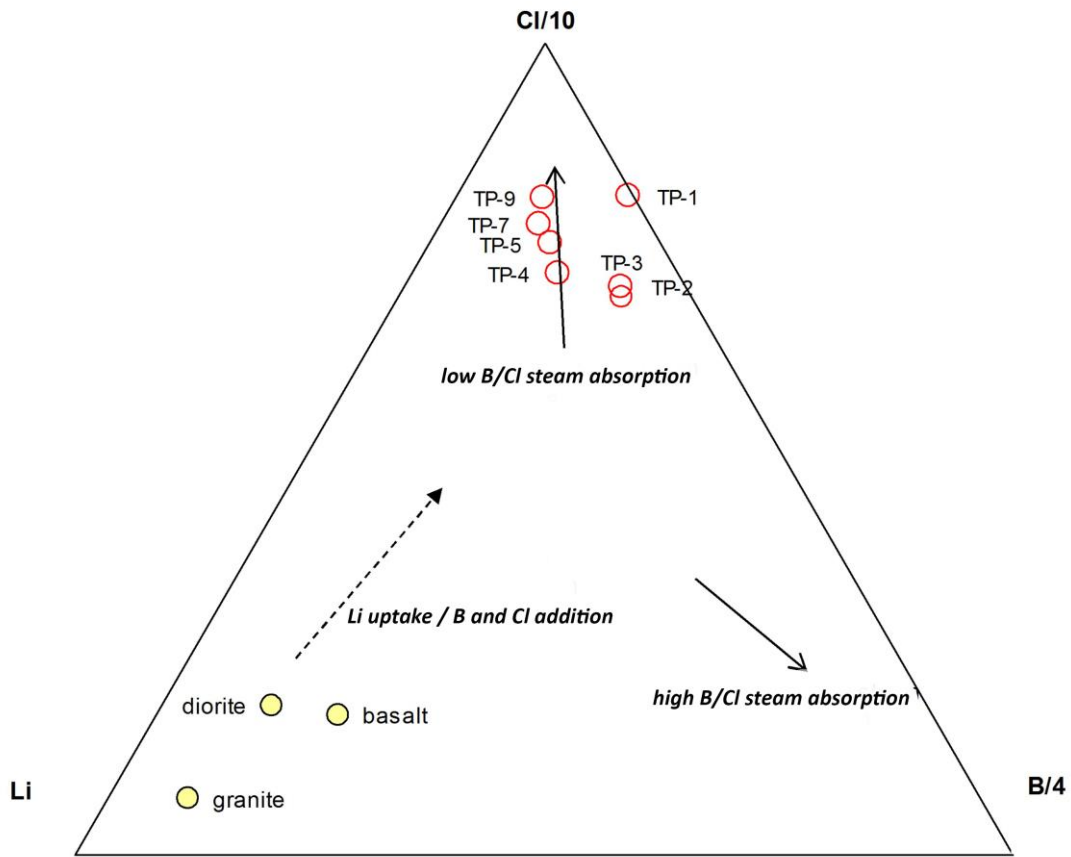
Kelompok Ca-HCO₃. Semua mata air dingin dengan pH netral termasuk dalam kelompok ini yang merupakan tipikal komposisi air tanah dengan pelarutan mineral sekitar (Mohammed et al., 2014) maupun bikarbonat produk dari penguraian material organik namun hanya sedikit

berasal dari CO₂ atmosfer yang terlarut (Alçiçek et al., 2016).

Kelompok Na-Cl-HCO₃. Jenis air terletak pada sudut bikarbonat atau *peripheral waters*, yang merupakan tipikal komposisi daerah *outflow* ataupun daerah kondensasi (Nicholson, 1993). Namun demikian nilai TDS untuk mata air panas Ciuyah jauh lebih besar daripada mata air panas Ciseupan yaitu 18,789 mg/L dan 3,315 mg/L berturut-turut.

Estimasi temperatur reservoir

Perhitungan geotermometer untuk mengetahui temperatur reservoir dilakukan melalui diagram Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) yang telah banyak diaplikasikan dalam eksplorasi dan monitoring reservoir panas bumi (Gambar 4). Dari diagram tersebut jelas terlihat bahwa mata air panas Ciuyah (TP-9) menunjukkan kesetimbangan parsial



Gambar 5. Diagram trilinear Li-Cl-B, secara umum memperlihatkan kesamaan evolusi fluida.

dengan perhitungan geotermometer yang relatif rendah yaitu sekitar 120°C. Sementara sampel lain terindikasi merupakan *immature waters* atau tidak dalam keadaan kesetimbangan, sehingga kurang dapat diandalkan untuk perhitungan geotermometer dikarenakan kandungan Mg yang terlalu tinggi. Kandungan Mg yang tinggi tersebut menunjukkan adanya pencampuran antara fluida panas bumi dengan Mg rendah dan air tanah yang lebih dangkal dengan kandungan Mg tinggi (Kuhn, 2004; Murray, 1996). Adanya pencampuran ini tidak memungkinkan dihitungnya geotermometer silika secara langsung. Hal ini juga terlihat dari kandungan silika sampel yang relatif rendah. Untuk memperkirakan temperatur berdasarkan silika, dapat digunakan model pencampuran silika - entalpi (Nicholson, 1993; Verma, 2000). Pemodelan berdasarkan dua model kelarutan silika yaitu kelarutan kuarsa tanpa *steam loss* (pemisahan uap) dan kuarsa dengan *steam loss*. Gambar 5 menunjukkan interpolasi air tanah dengan fluida termal terhadap kurva kelarutan

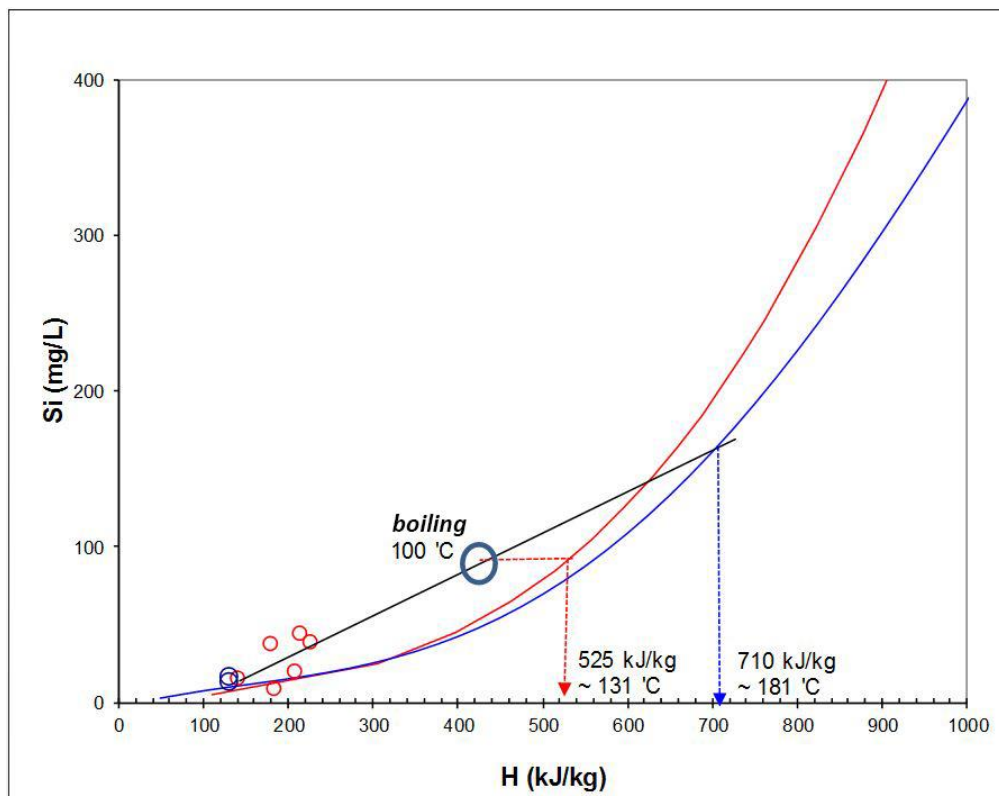
kuarsa yang menunjukkan perkiraan temperatur reservoir sekitar 131°C untuk model silika *steam loss* dan 181°C untuk model tanpa *steam loss*.

Untuk perhitungan geotermometer yang menggunakan rasio kimia seperti Na/K masih dapat dihitung secara langsung dengan asumsi proses pencampuran tidak merubah rasio Na/K secara signifikan karena komposisi Na dan K dalam air tanah jauh lebih rendah dibandingkan fluida panas bumi. Rumus geotermometer Na-K Fournier (Fournier, 1979) dan Giggenbach (Giggenbach, 1988) dapat digunakan dan menghasilkan temperatur bawah permukaan yang relatif tinggi dan rasional antara 121°C hingga 266°C (Tabel 4). Temperatur ini menunjukkan temperatur kesetimbangan terakhir sebelum fluida bercampur dengan air tanah dangkal.

Evolusi maturasi fluida atau *rock dissolution* dapat diperkirakan melalui komposisi Li, B dan Cl fluida seperti terlihat pada Gambar 6. Dalam diagram tersebut keseluruhan sampel terletak mendekati sudut Cl dan jauh dari plot pelarutan

Tabel 4. Perhitungan geotermometer Na/K (°C).

Kode	Lokasi	Fournier	Giggenbach
TP-1	Ciseupan	210	218
TP-2	Cipanas	214	221
TP-3	Bojong Cibubuan	212	220
TP-4	Ciledre	173	184
TP-5	Ciledre	172	183
TP-7	Cileungsing	178	189
TP-8	Cileungsing	177	188
TP-9	Ciuyah	121	135



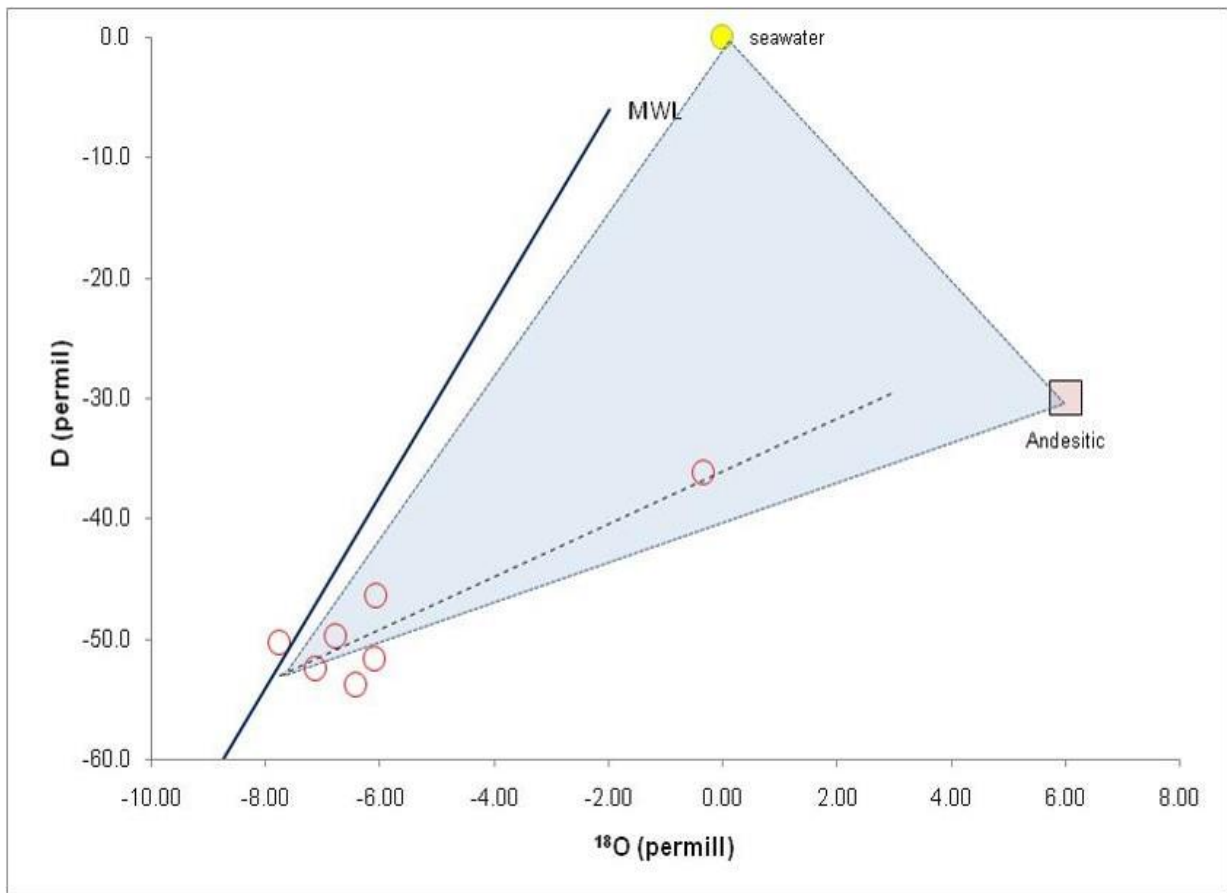
Gambar 5. Model pencampuran silika-entalpi untuk memperkirakan temperatur reservoir. Kurva merah = model kelarutan silika dengan *steam loss*, kurva biru = model kelarutan tanpa *steam loss*.

batuan di sudut Li. Hal ini menandakan bahwa seluruh fluida Gunung Tampomas memiliki kesamaan proses evolusi, bukan sekedar pelarutan batuan saja namun juga adanya penambahan Cl melalui absorpsi uap dengan rasio B/Cl yang rendah (Gudmundsson, 2015; Sepúlveda et al., 2004).

Komposisi isotop dan evolusi fluida

Berdasarkan data hasil analisis isotop dapat dibuat grafik hubungan antara $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ seperti pada Gambar 6.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa sebagian besar sampel terletak di sekitar garis meteorik, menandakan fluida Gunung Tampomas berasal dari air meteorik. Namun demikian, terdapat pergeseran oksigen (*oxygen shift*) yang mengindikasikan adanya interaksi antara fluida dengan batuan pada temperatur tinggi. Selain itu, terdapat satu sampel (Ciuyah) yang terletak menjauhi garis meteorik, mengindikasikan kemungkinan adanya (1) proses evaporasi atau (2) pencampuran dengan air magmatik maupun air laut. Kemungkinan yang pertama kurang rasional



Gambar 6. Komposisi $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$, menunjukkan asal fluida meteorik dibandingkan dengan komposisi air laut, magmatik dan garis meteorik.

mengingat temperatur mata air tergolong tidak terlalu tinggi yaitu sekitar $38,9^\circ\text{C}$ dan tidak ada proses pemanasan uap (*steam heated*). Selain itu, pengambilan sampel juga dilakukan di bawah permukaan pada outlet mata air sehingga dipastikan tidak ada proses evaporasi permukaan. Sementara untuk kemungkinan kedua lebih mendekati yaitu komposisi kimia air Ciuyah yang merupakan tipe klorida dengan komposisi Cl mencapai 10000 mg/L namun dengan pH mendekati netral menunjukkan kemungkinan pencampuran dengan sedikit (minor) komponen magmatik maupun air laut.

Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa fluida panas bumi Gunung Tampomas berasal dari air meteorik yang meresap (imbuh) melalui sistem sesar ke bawah permukaan hingga kontak dengan sumber panas (*heat source*). Fluida yang terpanasi naik menuju permukaan bersamaan dengan komponen volatil magmatik yang terdapat di

dalam sumber panas. Karena letak sumber panas yang dalam, terjadi kondensasi uap dalam perjalanan menuju permukaan lalu kondensat tersebut mengalir ke daerah *outflow* yaitu Ciseupan di barat daya dan Ciuyah di timur laut (Gambar 1). Letak reservoir yang dalam juga terlihat dari tidak adanya manifestasi berupa fumarol di Gunung Tampomas. Berdasarkan perhitungan, temperatur kesetimbangan Na/K di kedua daerah tersebut sebelum proses pencampuran adalah sekitar 210°C di Ciseupan dan 120°C di Ciuyah. Demikian pula dengan hasil model pencampuran silika-entalpi yang menghasilkan perkiraan temperatur reservoir sebesar 131°C hingga 181°C . Selain pencampuran dengan air tanah ada indikasi pencampuran dengan air laut atau *connate water* di Ciuyah. Hal ini didasarkan pada kandungan klorida yang sangat tinggi dan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H .

KESIMPULAN

Hasil analisis geokimia dan isotop fluida menunjukkan bahwa daerah panas bumi Gunung Tampomas memiliki potensi panas bumi dengan temperatur berkisar 120-220°C, yang tergolong potensi panas bumi entalpi medium. Fluida panas bumi Gunung Tampomas berasal dari air meteorik dengan sedikit pencampuran dengan air magmatik ataupun *connate water*. Sistem panas bumi Gunung Tampomas diperkirakan memiliki reservoir yang terletak cukup dalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini terselenggara atas biaya DIPA BATAN 2014. Penulis berterimakasih kepada Agus Martinus yang telah membantu pekerjaan lapangan dan Bungkus Pratikno yang telah membantu analisis isotop di laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Aggarwal, P., Groening, L., Kulkarni, K.M., Kurttas, T., Newman, B.D., Tanweer, A., 2009. Laser Spectroscopic Analysis of Liquid Water Samples for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes. IAEA Train. Course Ser. 35.
- Alçiçek, H., Bülbül, A., Alçiçek, M.C., 2016. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Yenice Geothermal Field (Denizli Basin, Southwestern Anatolia, Turkey). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 309, 118–138. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.025>
- Arnórsson, S., Bjarnason, J.Ö., Giroud, N., Gunnarsson, I., Stefánsson, A., 2006. Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids* 6, 203–216. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2006.00147.x>
- Clark, I., Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publisher, New York.
- Cumming, W., 2016. Geophysics and resource conceptual models in geothermal exploration and development, *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 97, 2016. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100337-4.00003-6>
- D4327-11, 2011. Standard Test Method for Anions in Water by Chemically Suppressed Ion. ASTM Int. West Conshohocken, PA 11, 1–9.
- D859-16, 2016. Standard Test Method for Silica in Water. ASTM Int. West Conshohocken, PA 11, 0–4.
- D859-16, 2009. Standard Test Method for Determination of Dissolved Alkali and Alkaline Earth Cations and Ammonium in Water and Wastewater by Ion. ASTM Int. West Conshohocken, PA 11.
- Darma, S., Gunawan, R., 2015. Country Update : Geothermal Energy Use and Development in Indonesia. *World Geotherm. Congr.* 2015 25–30.
- Djuri, 1995. Peta Geologi Lembar Arjawinangun, Jawa, Skala 1:100.000.
- Fournier, R.O., 1979. A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geotherm. Resour. Coun. Trans.* 3, 221–224.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749–2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Gudmundsson, G., 2015. Chloride boride relationship in the Pannonian Basin geothermal system, in: *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*.
- Kementerian ESDM, 2017. *Potensi Panasbumi Indonesia Jilid I*. Direktorat Panasbumi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Kuhn, M., 2004. *Reactive flow modeling of hydrothermal system*. Springer-Verlag, Berlin.
- Mohammed, N., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Le Coustumer, P., Lavastre, V., Bertrand, G., Charrier, G., Clauzet, M.L., 2014. Isotopic and geochemical identification of main groundwater supply sources to an alluvial aquifer, the Allier River valley (France). *J. Hydrol.* 508, 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.051>

- Murray, K.S., 1996. Hydrology and geochemistry of thermal waters in the Upper Napa Valley, California. *Ground Water* 34.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques. Springer-Verlag, Berlin.
- Reed, M.J., Mariner, R.H., 1991. Quality control of chemical and isotopic analysis of geothermal water samples, in: Proceedings 16th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California.
- Sepúlveda, F., Dorsch, K., Lahsen, A., Bender, S., Palacios, C., 2004. Chemical and isotopic composition of geothermal discharges from the Puyehue-Cordón Caulle area (40.5°S), Southern Chile. *Geothermics* 33, 655–673. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.10.005>
- Silitonga, P.H., 1973. Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa Barat, skala 1:1000.000.
- Verma, M.P., 2000. Chemical thermodynamics of silica: A critique on its geothermometer. *Geothermics* 29, 323–346. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00064-4)
- Vespasiano, G., Apollaro, C., Muto, F., Dotsika, E., De Rosa, R., Marini, L., 2014. Chemical and isotopic characteristics of the warm and cold water of the Luigiane Spa near Guardia Piemontese (Calabria, Italy) in a complex faulted geological framework. *Appl. Geochemistry* 41, 73–88.