

TIPE DAN ESTIMASI TEMPERATUR AIR BAWAH PERMUKAAN DAERAH PANAS BUMI GUNUNG PAPANDAYAN, GARUT, JAWA BARAT

The Type and Estimation of Subsurface Water Temperature in Geothermal Area, Papandayan Mountain, Garut, West Java

Fauzan Thaha Assegaf¹, Agus Didit Haryanto², Johannes Hutabarat³, dan Dewi Gentana⁴

Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

Jalan Raya Bandung-Sumedang Km. 21 Jatinangor 45363, Telp./Fax. 022-7796546.

E-mail: fauzan.assegaf9@gmail.com¹, agus.didit.haryanto@gmail.com²,

adamunpad@gmail.com³, dan dewigentana06@gmail.com⁴

ABSTRAK

Lokasi daerah penelitian Gunung Papandayan secara administratif berada di Kecamatan Cisurupan, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat. Daerah tersebut memiliki potensi panas bumi. Tujuan penelitian adalah menganalisis pola struktur geologi, tipe dan asal usul fluida, serta perkiraan temperatur bawah permukaan fluida panas bumi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis citra SRTM-DEM untuk mengetahui arah kelurusan punggung dan lembah di daerah penelitian. Analisis data geokimia fluida panas bumi dilengkapi dengan observasi secara langsung di lapangan terhadap fenomena bentang alam, indikasi struktur geologi, dan sifat fisik manifestasi panas bumi di permukaan. Hasil analisis kelurusan dari citra SRTM-DEM yang diolah pada diagram *rosset* memperlihatkan daerah penelitian memiliki arah utama kelurusan (struktur geologi) Timur Laut – Barat Daya. Hasil plotting data kimia air pada diagram segitiga $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, Cl-Li-B dan Na-K-Mg , memperlihatkan tipe air di daerah penelitian termasuk jenis air klorida-sulfat dan sulfat. Fluida geotermal tersebut bergerak ke permukaan sebagai *upflow*. Fluida tersebut diperkirakan telah mengalami *mixing* dan *diluted* dengan air tanah dangkal atau *meteoric water*. Telah terjadi reaksi yang signifikan antara fluida dan batuan (*rock origin*) yang dilewatinya. Hal tersebut diperlihatkan oleh berlimpahnya kandungan Mg pada kondisi *immature water*. Hasil perhitungan geotermometer air, diperkirakan temperatur bawah permukaan di daerah penelitian berkisar antara 170°C - 237°C.

Kata Kunci: Gunung Papandayan, citra SRTM-DEM, manifestasi panas bumi, karakteristik air panas bumi, geotermometer, temperatur bawah permukaan

ABSTRACT

The location of the Papandayan study area is administratively located in the Cisurupan District, Regency Garut, West Java Province, was chosen as a research site because estimated to be an area that has geothermal potential. The purpose of this study is to determine the direction of the alignment of the structure, type of fluid, origin, and approximate subsurface temperature of the geothermal fluid. The method used in this research is DEM-SRTM image to determine the pattern of ridge and valley alignment that reflects the geological structure in the study area. Data processing of geochemical laboratory analysis results of geothermal fluid and remote sensing are supported by observing the phenomenon of landscape, geological structure and physical properties of geothermal manifestations on the surface in the field. The results of the alignment analysis of the SRTM-DEM

image processed in the roset diagram shows the alignment pattern (geological structure) in the study area tend to have North East-South West. The results of water chemical data plotting in the Cl-SO₄-HCO₃, Cl-Li-B and Na-K-Mg ternary diagrams show the characteristics, types of water in the study area as chloride-sulfate and sulfate types. The fluids move to the surface as an upflow and have been mixed and diluted with shallow ground water or meteoric water, and significant reaction occurs between the fluid and the wall rock which it passes. The results of the calculation by using water geothermometer, it can be estimated that subsurface temperature in the study area between 170°C-237°C.

Keywords: Gunung Papandayan, SRTM-DEM imagery, geothermal manifestations, geothermal water characteristics, geothermometer, subsurface temperature

PENDAHULUAN

Panas bumi didefinisikan sebagai perpindahan panas secara alami dalam volume terbatas di kerak bumi. Panas tersebut berpindah dari sumber hingga zona pelepasan panas (Hochstein dan Browne, 2000). Suatu sistem panas bumi merupakan gabungan dari empat unsur yang wajib dipenuhi, yaitu:-

- a. Sumber panas (*heat sources*) yang memindahkan energi panas ke batuan sekitar. Sumber panas dalam sistem panas bumi umumnya berupa magma yang terbentuk akibat peleburan lempeng saat terjadi subduksi.
- b. Reservoir yang bersifat permeabel dan porositas tinggi hingga dapat menyimpan fluida panas bumi. *Reservoir* panas bumi dapat berupa batuan klastik ataupun batuan vulkanik yang mengalami rekahan kuat.
- c. Batuan penudung (*cap rock*) yang berfungsi sebagai perangkap fluida panas bumi agar tidak lolos dari *reservoir*.
- d. Fluida panas bumi yang berasal dari injeksi air meteorik (air permukaan) ataupun muncul dalam kerak bumi sebagai air magmatik.

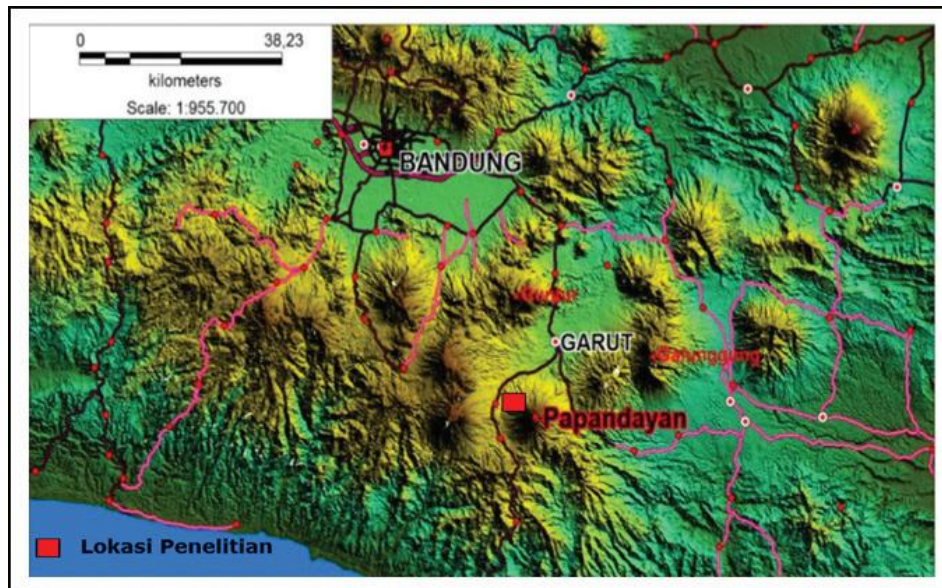
Hochstein dan Browne (2000) membedakan sistem panas bumi menjadi tiga klasifikasi berdasarkan pada tingginya temperatur, sebagai berikut:

1. Sistem panas bumi bertemperatur rendah, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur < 125°C.
2. Sistem panas bumi atau reservoir bertemperatur sedang, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida bertemperatur antara 175° - 225°C.
3. Sistem panas bumi atau reservoir bertemperatur tinggi, yaitu suatu sistem yang reservoirnya mengandung fluida bertemperatur > 225°C.

Letak Indonesia yang dilalui oleh jalur gunung api (*ring of fire*) (Bemmelen, 1949) menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi, mulai dari yang bertemperatur rendah sampai dengan tinggi. Temperaturnya sebesar 29.000 MW atau setara dengan 40% cadangan panas bumi yang ada di dunia. Keberadaan sistem panas bumi umumnya berkaitan erat dengan kegiatan vulkanisme dan magmatisme. Sistem panas bumi biasanya berada pada daerah busur vulkanik (*volcanic arc*) dari sistem tektonik lempeng.

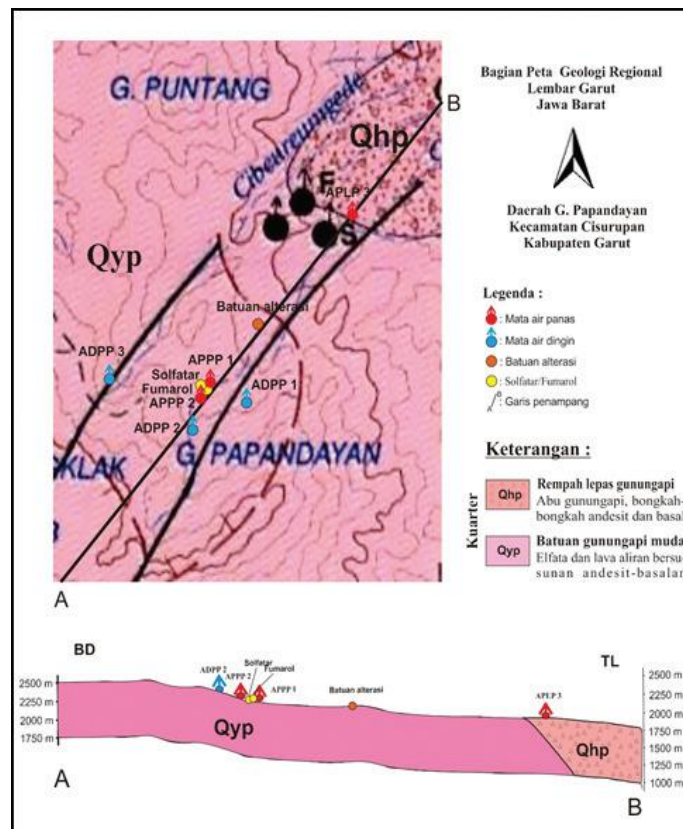
Gunung Papandayan merupakan salah satu lokasi di Indonesia yang diperkirakan mempunyai potensi panas bumi. Secara geografis, daerah penelitian ini berada pada koordinat 7°19'56"LS -

107° 43'02"BT dan 7°17'32"LS - 107°44'56"BT. Secara administratif Gunung Papandayan berada di Kecamatan Cisarupan, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat, (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian. (Sumber: Dokumen Fauzan T.A., 2020)

Menurut M. Alzwar, dkk. (1992), stratigrafi di daerah penelitian terdiri dari dua satuan batuan yang berumur kuartar (Gambar 2). Satuan batuan rempah lepas Gunung Api Papandayan (Qhp) terdiri dari abu gunung api, bongkah-bongkah aliran lava andesit, dan basal. Itu semua merupakan bagian atas dari endapan satuan batuan lainnya berupa batuan gunung api muda (Qyp) yang terdiri dari elfata dan lava aliran bersusunan andesit-basalan.



Gambar 2. Daerah penelitian berada pada bagian puncak Gunung Papandayan yang memiliki dua satuan batuan, yaitu (Qyp) dan (Qhp), berumur kuartar. (Sumber: M. Alzwar, dkk., 1992)

Bentang alam Gunung Papandayan memperlihatkan fenomena bentang alam dengan morfologi pegunungan (perbukitan) lereng yang terjal, kemiringan punggung, lembah yang curam, dan memperlihatkan struktur geologi di permukaan. Potensi energi panas bumi di lokasi ini diindikasikan oleh adanya manifestasi panas bumi di permukaan berupa fumarol, solfatar, batuan alterasi, mata air panas, tanah beruap (*steaming ground*), lumpur panas (*mud pool*), dan kolam air panas (*steam heated water*). Penelitian PVMBG (2013) menunjukkan adanya penurunan pH pada beberapa sumber mata air di lokasi ini. Hal tersebut disebabkan oleh larutan sulfat yang berasal dari kawah bercampur dengan beberapa mata air di sekitarnya. Kadar sulfat sebesar 11,50 mg/L, masih dapat ditemukan di mata air. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem perairan di sekitar kawah Gunung Papandayan relatif telah dipengaruhi oleh aktivitas solfatar.

Perkembangan struktur geologi yang sangat aktif di daerah Garut, diperkirakan erat hubungannya dengan kemunculan manifestasi panas bumi di daerah ini. Pada sisi lain, lokasi Gunung Papandayan sangat dekat dengan lokasi-lokasi panas bumi lainnya, seperti lapangan Kamojang dan Darajat. Hal tersebut menjadikan lokasi ini sangat menarik untuk dikaji, baik dari sisi geologi struktur maupun karakteristik geokimianya.

Penelitian tentang karakteristik fluida panas bumi menjadi penting. Dengan mengidentifikasi karakteristik atau tipe fluida panas bumi di daerah Gunung Papandayan, kondisi bawah permukaan dan proses yang terjadi selama fluida bergerak dapat dipahami dengan baik.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pola struktur geologi (kelurusan) yang berhubungan dengan kemunculan manifestasi panas bumi. Penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi tipe dan asal-usul fluida serta kondisi temperatur bawah permukaan (*reservoir*).

METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dari minggu pertama Januari hingga minggu keempat April 2020. Bahan atau peralatan yang dipergunakan dalam penelitian adalah semua yang terkait dengan penentuan pola struktur geologi di daerah penelitian melalui analisis kelurusan punggung dan lembah. Selain itu, dilengkapi juga dengan pengamatan visual di lapangan (pengamatan batuan dan sifat fisik manifestasi panas bumi), yaitu: peta topografi, citra DEM-SRTM, termometer, GPS, kertas filter, kantong sampel batuan, botol sampel air, loupe, komparator, pH meter dan larutan, HNO_3 , dan HCL.

Analisis studio untuk interpretasi pola kelurusan (struktur geologi) menggunakan *software* ArcGIS pada citra *Digital Elevation Model-Shuttle Radar Topography Mission* (DEM-SRTM) (NASA, 2020). Hasil analisisnya diolah pada *software rockwork*, kemudian observasi lapangan untuk pengamatan batuan, morfologi, indikasi struktur geologi dan keberadaan, serta sifat fisik manifestasi panas bumi. Analisis laboratorium untuk enam sampel air panas dilakukan untuk mendapatkan nilai konsentrasi unsur kimia fluida panas bumi.

Hasil analisis kimia kemudian diploting ke dalam tiga *ternary* diagram. Diagram segitiga $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ untuk menentukan tipe fluida, diagram segitiga Cl-Li-B untuk memperkirakan asal-usul dan pergerakan fluida, serta diagram segitiga Na-K-Mg untuk mengetahui kondisi dan kesetimbangan fluida. Untuk memperkirakan temperatur bawah permukaan daerah penelitian digunakan perhitungan geotermometer Na-K (Giggenbach, 1988 dan Thruessdell, 1976) juga geotermometer silika (SiO_2) (Fournier, 1973).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian mencakup aspek geologi, morfologi, struktur geologi, serta geokimia fluida panas bumi. Dalam hal ini, penelitian fokus pada hasil pengolahan atau perhitungan dari data hasil analisis laboratorium kimia fluida panas bumi dari enam sampel mata air yang diambil di daerah penelitian. Pengolahan data hasil laboratorium analisis kimia fluida panas bumi diaplikasikan pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, Cl-Li-B, Na-K-Mg, serta perhitungan geotermometer air.

Geologi Daerah Penelitian

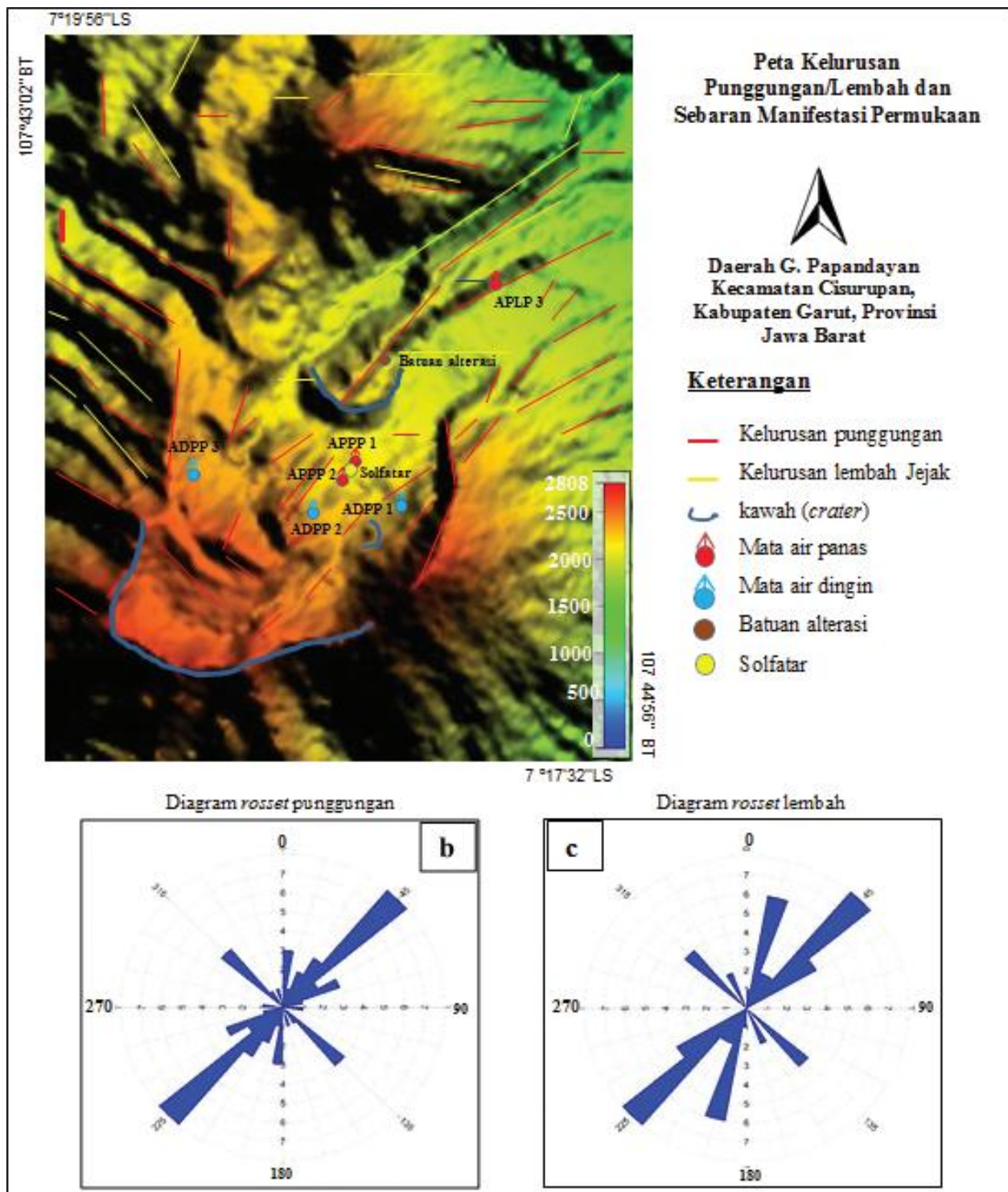
Kondisi batuan umumnya telah mengalami tingkat pelapukan sedang hingga sangat tinggi. Sebagian batuan memperlihatkan telah mengalami perubahan (*altered*) akibat adanya aktivitas panas bumi. Dibeberapa tempat di lereng Gunung Api Papandayan dijumpai singkapan lava andesit berwarna abu-abu gelap, tekstur porfirik tersusun oleh mineral-mineral ferro-magnesian silikat di antaranya plagioklas, piroksen, dan hornblende (Gambar 3).



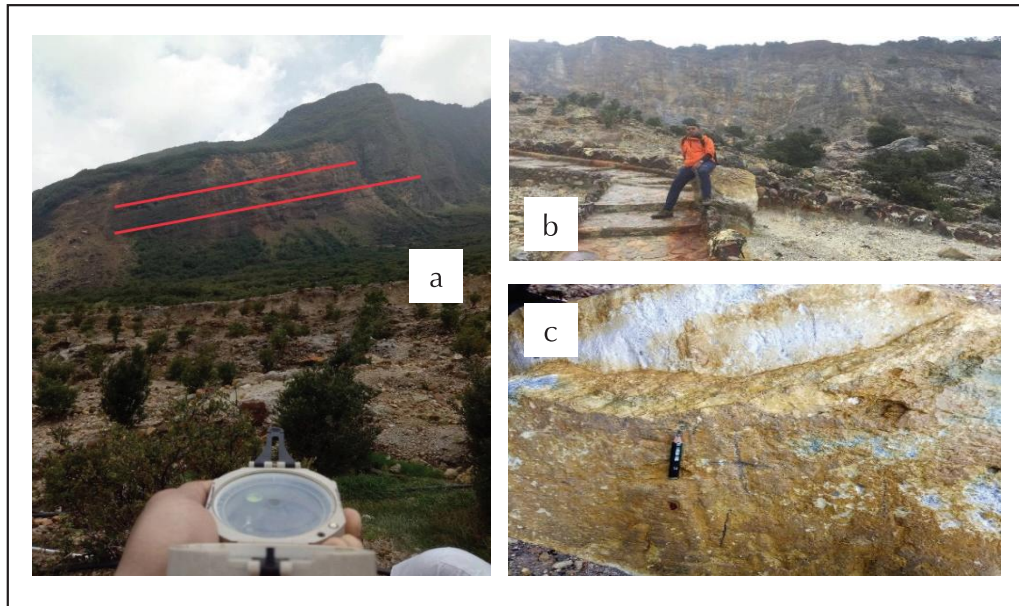
Gambar 3. Perselingan lava dengan breksi fragmen batuan andesit-basaltik terdapat di lereng Papandayan bagian barat yang telah mengalami ubahan (*altered*). Hal tersebut terjadi akibat adanya aktivitas panas bumi menjadi batuan lempung (*kaolinit*). (Sumber: Dokumen Fauzan T.A., 2020)

Daerah penelitian memiliki lereng yang cukup terjal dengan elevasi terendah pada ketinggian ± 1948 Mdpl dan elevasi tertinggi pada ketinggian ± 2426 Mdpl. Hal itu memperlihatkan bentang alam, pola kelurusan punggung, lembah dan jenis batuan yang mempunyai peranan dalam perkembangan struktur geologi di daerah penelitian.

Indikasi struktur geologi melalui pengamatan secara visual di lapangan dapat diamati melalui fenomena punggung (perbukitan) memanjang dengan dinding yang terjal sebagai gawir sesar (*escarpment*) dan cermin sesar (*slicken side*) pada aliran lava andesit-basaltik (Gambar 4). Berdasarkan interpretasi pada citra SRTM-DEM di daerah penelitian, indikasi struktur geologi dapat diamati melalui kenampakan kelurusan-kelurusan punggung dan lembah (lereng). Kelurusan tersebut dapat dipergunakan sebagai indikasi struktur geologi (patahan). Hasil plotting data kelurusan-kelurusan punggung dan lembah yang diperoleh dari interpretasi citra SRTM-DEM diolah ke dalam diagram *rosset*. Hal tersebut memperlihatkan pola utama struktur geologi (patahan) di daerah penelitian berarah Timur Laut – Barat Daya, (Gambar 5).



Gambar 4. a. Gawir sesar yang berada pada timur dari akses jalan menuju puncak Gunung Papandayan dengan azimuth N88°E, b. Gawir sesar dengan azimuth N291°E pada bagian Barat Laut lereng Gunung Papandayan, dan c. Cermin sesar dijumpai pada fragmen andesit breksi (bongkahan batuan) di Timur Laut lereng Gunung Papandayan. (Sumber: Dokumen Fauzan T.A., 2020)



Gambar 5. a. Peta Kelurusan Punggungan dan Lembah, b. Diagram *rosset* kelurusan punggungan memperlihatkan pola utama berarah Timur Laut–Barat Daya, dan c. Diagram *rosset* kelurusan lembah memperlihatkan pola utama berarah Timur Laut – Barat Daya. (Sumber: Dokumen Fauzan T.A., 2020)

Karakteristik Kimia Fluida Daerah Penelitian

Pengamatan sifat fisik dan analisis geokimia air panas, hangat, dan dingin di lapangan dilakukan pada enam lokasi, yaitu Air Panas Puncak Papandayan 1 (APPP 1), Air Panas Puncak Papandayan 2 (APPP 2), Air Panas Lereng Papandayan 3 (APLP 3), serta air dingin ADPP 1, ADPP2 dan ADPP 3. Hasil pengamatan sifat fisik manifestasi dan analisis ke-6 sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis fisik manifestasi dan analisis kimia unsur atau senyawa air daerah penelitian

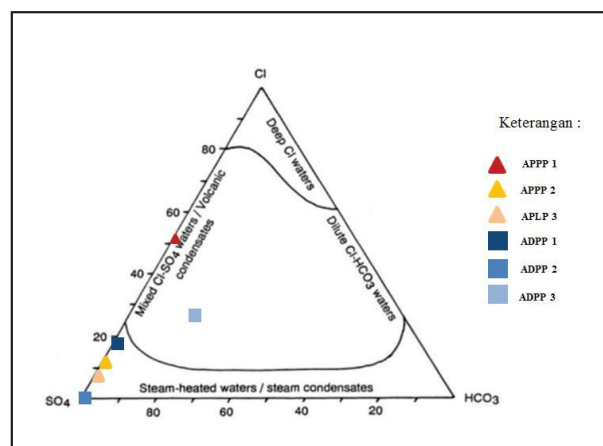
No	Parameter	Manifestasi (mata air panas, hangat, dan dingin)					
		APPP 1	APPP 2	APLP 3	ADPP 1	ADPP 2	ADPP 3
1	pH (mg/L)	1.45	2.47	2.78	4.74	3.36	7.16
2	Warna	Bening	Keruh	Bening	Bening	Bening	Bening
3	Rasa	Asam	Asam	Asam	Asam	Asam	-
4	Bau	Belerang	Belerang	-	Belerang	Belerang	-
5	Temperatur	90,5°C	89,8	31,6	20,1 °C	28,2 °C	14,9 °C
6	DHL $\mu\text{S}/\text{cm}$	10480	2880	2270	977	2720	188
7	TDS (mg/L)	3780	3031	3368	1248	4732	168
8	SiO_2 (mg/L)	420.30	448.40	173.14	74.96	215.37	56.27
9	B (mg/L)	15.84	4.57	3.73	0.32	0.47	0.18
10	Al^{3+} (mg/L)	197.29	16.60	272.54	5.40	269.65	0.02
11	As^{3+} (mg/L)	0.06	0.06	0.04	0.10	0.02	0.00
12	NH_4^+ (mg/L)	1.18	2.31	2.03	1.51	0.97	0.27
13	F^- (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	Cl^- (mg/L)	1440.95	246.02	210.87	140.58	20.00	25.00
15	SO_4^{2-} (mg/L)	1333.23	1590.32	2198.43	605.64	3075.99	60.00
16	HCO_3^- (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.28
17	CO_3^- (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

No	Parameter	Manifestasi (mata air panas, hangat, dan dingin)					
		APPP 1	APPP 2	APLP 3	ADPP 1	ADPP 2	ADPP 3
18	Ca ²⁺ (mg/L)	111.31	173.53	96.23	156.87	332.51	24.69
19	Mg ²⁺ (mg/L)	47.98	123.67	28.50	40.15	104.32	10.46
20	K ⁺ (mg/L)	18.07	49.58	8.16	4.54	3.00	3.20
21	Na ⁺ (mg/L)	51.35	143.07	20.57	21.59	75.14	7.08
22	Fe ³⁺ (mg/L)	14.81	8.53	23.27	0.15	0.51	0.00
23	Li ⁺ (mg/L)	0.10	0.09	0.02	0.01	0.09	0.00

Tabel 2. Hasil presentase persentase kimia unsur/senyawa Cl, SO₄, HCO₃, Na, K, dan Mg daerah penelitian

Parameter	Kode manifestasi					
	APPP 1	APPP 2	APLP 3	ADPP 1	ADPP 2	ADPP 3
Cl (%)	51.94	13.39	8.75	18.83	0.64	22.06
SO ₄ (%)	48.05	86.60	91.24	81.16	99.35	52.96
HCO ₃ (%)	0	0	0	0	0	24.96
Cl (%)	81.05	68.83	69.03	84.18	40.48	51.44
Li (%)	1.12	5.59	6.547	11.97	40.48	41.15
B (%)	17.82	25.57	24.42	3.83	19.02	7.40
Na (%)	0.71	1.21	0.37	0.33	0.72	0.21
K (%)	2.52	4.21	1.49	0.70	0.29	0.97
Mg (%)	96.73	94.56	98.12	98.95	98.98	98.80

Data kimia yang digunakan untuk menentukan tipe fluida reservoir adalah kandungan relatif dari klorida (Cl), sulfat (SO₄), dan bikarbonat (HCO₃). Pengolahan data dilakukan dengan menghitung persentase unsur Cl, SO₄, dan HCO₃ (Tabel 2) yang kemudian diplot dalam diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Giggenbach, 1988), seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Segitiga diagram kandungan unsur Cl-SO₄-HCO₃ dalam air panas di daerah penelitian (Sumber: Giggenbach, 1988)

Dari hasil plotting kimia fluida air panas di daerah penelitian pada segitiga diagram Cl-SO₄-HCO₃ memperlihatkan bahwa tipe fluida panas bumi di daerah Gunung Papandayan termasuk ke dalam tipe air sulfat, seperti terlihat pada posisi mata air panas APPP 2, APLP 3 yang merupakan *steam heated waters/steam condensates*. Dapat diinterpretasikan bahwa kedua mata air panas

tersebut merupakan fluida yang terbentuk di kedalaman dangkal sebagai akibat proses kondensasi gas panas bumi dari bawah permukaan bergerak menuju permukaan. Keberadaan air dingin ADPP 1 dan ADPP 2 masuk ke dalam tipe air sulfat atau *steam heated waters/steam condensates* sebagai air tanah dangkal (*connate water*) yang mengalami proses kondensasi pergerakan gas SO_4 .

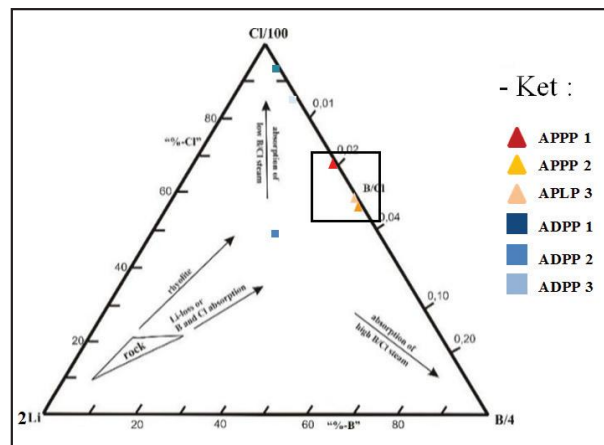
Mata air panas APPP 1 yang memiliki nilai kandungan SO_4 dan Cl yang relatif hampir sebanding, memperlihatkan fluida tersebut termasuk ke dalam tipe air panas sulfat – klorida. Tipe air panas APPP 1 ini dapat diinterpretasikan fluida panas bumi ketika menuju permukaan telah mengalami pencampuran (*mixing*) antara air klorida dan air sulfat. Air klorida ini juga melewati dan bereaksi dengan batuan asal (*rock origin*) yang mengandung sulfur dan *ion sulphide* (H_2S). Karena itu, dalam air klorida (Cl) teroksidasi oleh SO_4 .

Manifestasi air panas APPP 1 masuk ke dalam tipe air *mixed chloride – sulphate waters* atau *volcanic condensates*. Hal ini menggambarkan terbentuknya sistem kesetimbangan fluida panas bumi di kedalaman yang dipengaruhi oleh adanya proses pencampuran (*mixing*), pelarutan (*diluted*), dan adanya interaksi fluida dengan batuan yang dilaluinya selama perjalanannya dari bawah permukaan (*reservoir*) panas bumi menuju permukaan. Demikian halnya untuk mata air dingin ADPP 3 dari hasil plotting masuk ke dalam tipe *mixed chloride – sulphate waters/volcanic condensates* mengalami proses pencampuran dan pelarutan sebagai “*connate water*” yang keberadaannya jauh dari sumber panas bumi. Hal ini didukung oleh konsentrasi HCO_3 sebesar 24% lebih menunjukkan bahwa mata air tersebut telah bercampur dengan mata air permukaan.

Karakteristik Reservoir dan Asal Air Panas

Dari analisis sampel mata air panas diperoleh data berupa nilai konsentrasi Cl antara 210,87 - 1440,95 mg/L, konsentrasi Li antara 0,02 – 0,12 mg/L, dan nilai konsentrasi B antara 3,73 – 15,84 mg/L. Plotting pada diagram segitiga Cl, B, dan Li, nilai dari unsur Cl dan B dihitung terlebih dahulu menjadi Cl/100, B/5, 2Li baru kemudian total nilai dari ketiga unsur ini dibuat dalam bentuk persen (%), seperti ditampilkan pada Tabel 2. Beberapa sampel mata air (panas, hangat, dan dingin) memiliki konsentrasi pada setiap unsur yang berbeda-beda. Namun, dalam persentase (%) tidak begitu jauh perbedaannya. Setiap manifestasi yang keluar ke permukaan mengalami reaksi dan jenis batuan yang dilewati cenderung berbeda. Terdapatnya konsentrasi unsur B lebih besar dibandingkan dengan unsur Li. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran fluida panas bumi bergerak lateral atau ke samping sebelum sampai ke permukaan (Nicholson, 1993).

Hasil plotting konsentrasi kimia pada diagram segitiga Cl-Li-B (Giggenbach, 1988), untuk mengetahui pergerakan dan asal fluida manifestasi mata air panas (*hot springs*) APPP 1, APPP 2, mata air hangat (*warm spring*) APLP 3 dan air dingin (*cold springs*) ADPP 1, ADPP 2, dan ADPP 3 terlihat pada Gambar 7. Hasil plotting secara keseluruhan posisi mata air panas, hangat, dan dingin berada pada tepi garis antara konsentrasi Cl/100 dan B/4 dengan posisi yang berbeda.



Gambar 7. Diagram segitiga kandungan unsur Cl Li-B dalam air panas di daerah penelitian.
(Sumber: Giggenbach, 1988)

Diagram segitiga Cl-Li-B lebih difokuskan pada hasil plotting titik sampel manifestasi air panas. Aplikasi diagram segitiga Cl-Li-B digunakan untuk mengetahui asal fluida panas bumi yang berkaitan dengan reservoir panas bumi di kedalaman. Hasil plotting persentase data kimia unsur Cl, Li, dan B memperlihatkan dari ketiga sampel air panas (APPP 1, APPP 2, dan APLP 3), secara keseluruhan berada pada posisi lebih dominan Cl walaupun air panas APPP 1 berada sedikit di atas dari air panas APPP 2 dan APLP 3. Lokasi APPP 1 lebih dekat dengan sudut Cl (konsentrasi maksimum Cl) dan mata air panas lokasi APLP 3 dan APPP 2 berada pada tengah garis konsentrasi Cl dan B. Ketiga mata air panas tersebut mengalami proses penyerapan gas magmatik dengan rasio B/Cl seimbang.

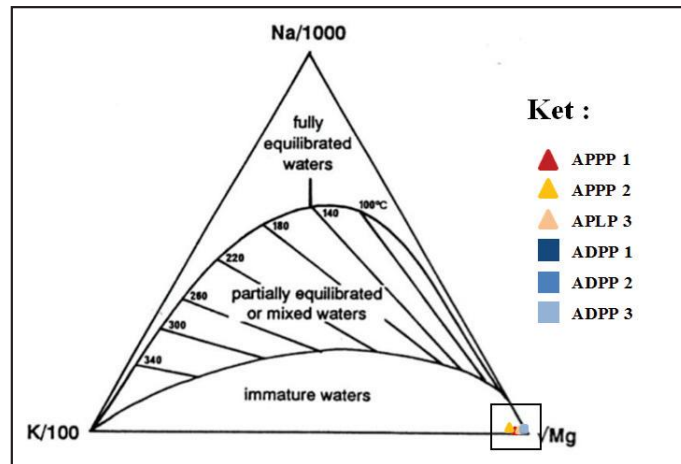
Nilai konsentrasi Cl yang lebih besar daripada mata air panas APPP1 dibandingkan dengan nilai konsentrasi Cl dari mata air panas APPP 2 dan APLP 3. Dapat diperkirakan bahwa mata air panas APPP1 lebih dekat dengan sumber panas dibandingkan dengan mata air panas APPP 2 dan APLP 3 dari sistem panas bumi di daerah penelitian. Konsentrasi Cl yang tinggi mengindikasikan bahwa air panas yang naik ke permukaan merupakan fluida yang berasal dari sumber panas mengalami pendinginan relatif cepat oleh batuan sekitar aliran fluida. Hal ini disebabkan oleh unsur Cl mempunyai sifat susah bereaksi, mudah berpindah, dan bersifat stabil. Cl merupakan unsur yang pertama kali terbentuk pada sistem panas bumi. Biasanya terjadi pada temperatur 350°C dengan kadar konsentrasi yang sangat tinggi (Nicholson, 1993).

Hasil plotting sampel air panas APPP 1, APPP 2, dan APLP 3 pada diagram Cl- Li-B di atas, memperlihatkan semuanya berada pada posisi cukup jauh dari unsur B. Hal ini menandakan bahwa selama perjalanan ketiga air panas tersebut dari sumber panas ke permukaan mengalami sedikit pengenceran oleh batuan yang dilewati oleh aliran air panas. Proses pencucian oleh batuan samping berupa batuan beku yang bersifat asam menyebabkan rendahnya kandungan unsur B.

Ketiga air panas dari lokasi APPP 1, APPP 2, dan APLP 3 dari diagram segitiga Cl-Li-B berada jauh dari unsur Li. Hal tersebut juga mengindikasikan bahwa keberadaan ketiga mata air panas di lokasi penelitian berada jauh dari sumber panas sistem panas bumi. Unsur Li mudah terserap oleh mineral sekunder seperti klorit, kuarsa, dan lempung. Dengan begitu, semakin jauh jarak migrasi fluida ke permukaan maka konsentrasi Li akan semakin berkurang (Nicholson, 1993).

Kesetimbangan Fluida

Perhitungan nilai Na-K-Mg menghasilkan persentase dari ketiga unsur tersebut dengan kisaran nilai untuk Na ; 0,21% – 1,21%, K ; 0,29 – 4,21%, dan Mg ; 94,56-98,98% (Tabel 2). Plotting pada diagram segitiga Na-K-Mg meperlihatkan fluida berada pada kondisi maksimal dominan ke arah Mg (Gambar 8).



Gambar 8. Diagram segitiga kandungan unsur Na-K-Mg di daerah penelitian. (Sumber: Giggenbach, 1988)

Konsentrasi Mg relatif tinggi karena adanya peningkatan kandungan Mg pada fluida yang disebabkan proses pencampuran fluida panas dengan air tanah pada kondisi *immature water*. Kondisi *immature water* juga mengindikasikan bahwa batuan *reservoir* terletak pada kondisi temperatur dan tekanan yang tinggi. Sebelum sampai ke permukaan telah mengalami pengenceran cukup intensif oleh air permukaan (*meteoric water*) yang kaya akan kandungan Mg.

Temperatur Bawah Permukaan

Berdasarkan karakteristik tipe air panas, geotermometer air yang digunakan dalam perhitungan untuk memperkirakan temperatur bawah permukaan (*reservoir*) di daerah penelitian menggunakan persamaan geotermometer Na,K (Giggenbach (1988) dan Thruessdell (1976) dan konsentrasi silika (SiO_2) (Fournier (1973)). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3 .

Tabel 3. Hasil perhitungan geotermometer Na-K dan silika (SiO_2)

Manifestasi Air Panas	Na-K (°C)		SiO_2 (°C)
	Giggenbach (1988)	Thruessdell (1976)	Fournier (1973)
AP PP 1	357,79	380,14	237,04
AP PP 2	355,89	376,84	242,69
AP LP 3	373,04	407,15	170,48

Hasil perhitungan geotermometer memperlihatkan perkiraan temperatur fluida bawah permukaan (*reservoir*) berkisar dari 170 - 237°C (Fournier, 1973), 357- 373°C (Giggenbach, 1988), dan 376 - 407°C (Thruessdell, 1976). Nilai yang diperkirakan akurat adalah nilai dari perhitungan geotermometer silika karena seluruh sampel memiliki kandungan Mg yang dominan. Hal tersebut diperkirakan sudah bereaksi dengan batuan atau lainnya yang salah satunya adalah unsur silika.

Hasil perhitungan temperatur air panas dengan metode geotermometer persamaan Giggenbach (1988), Thruessdell (1976), dan Fournier (1973) memperlihatkan adanya perbedaan temperatur bawah permukaan. Hal ini dimungkinkan pada saat fluida panas bumi bergerak ke permukaan bereaksi dengan batuan sampling pada kondisi tertentu mencapai kesetimbangan yang berbeda-beda. Perkiraan temperatur bawah permukaan di daerah penelitian yang dipertimbangkan sebagai temperatur *reservoir*, yaitu hasil perhitungan geotermometer air silika. Hal ini didasarkan nilai konsentrasi silika (SiO_2) pada fluida panas bumi lebih besar dibandingkan dengan nilai Na-K.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

- 1) Berdasarkan analisis kelurusan-kelurusan punggung dan lembah pada peta SRTM-DEM yang digambarkan pada diagram rosset memperlihatkan pola kelurusan (struktur geologi) di daerah penelitian berarah Timur Laut-Barat Daya. Hal tersebut berhubungan dengan kemunculan manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas, tanah beruap (*steaming ground*), danau/kolam air panas (*steam heated water*), batuan alterasi, solfatara, dan fumarol.
- 2) Berdasarkan plotting data kimia air pada diagram segitiga $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, Cl-Li- B dan Na-K-Mg , memperlihatkan karakteristik tipe air di daerah penelitian APPP1 masuk ke dalam tipe air *mixed chloride – sulphate waters* atau *volcanic condensates*. Adapun posisi mata air panas APPP2 dan APLP3 merupakan *steam heated waters/steam condensates* yang menjadi tipe sulfat. Semuanya berada pada kondisi *immature water* yang memiliki kandungan Mg berlimpah. Mata air tersebut bergerak ke permukaan sebagai *upflow* dan dalam perjalanannya mengalami *mixing* dan *diluted* dengan mata air tanah dangkal atau *meteoric water*. Tingginya konsentrasi klorida (Cl) dibandingkan dengan baron (B) pada mata air panas, mengindikasikan bahwa fluida dari sumber panas saat bergerak ke permukaan mengalami pendinginan yang relatif cepat (kondisi *absorption of low B/Cl steam*).
- 3) Berdasarkan besarnya nilai konsentrasi silika (SiO_2), melalui perhitungan geotermometer air dapat diperkirakan bahwa temperatur bawah permukaan di daerah penelitian berkisar antara $170^\circ\text{C} - 237^\circ\text{C}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada pihak PPSDM Geominerba yang telah memberikan kesempatan untuk penulis menerbitkan tulisan ini. Terima kasih juga kepada para penelaah (*reviewer*) yang memberikan masukan berharga bagi perbaikan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dan karya ilmiah ini. Semoga bantuannya selalu dibalas Tuhan Yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- Alzwar, M., Akbar, N., Bachri, C., (1992). Peta Geologi Garut- Pameungpeuk, Jawa Barat, Skala 1:250.000, Pusat dan Pengembangan Geologi, Bandung, lembar 1208-6.
- Bemmelen, R. (1949). The Geology of Indonesia, vol. I, General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes, Government Printing Office, The Hague.
- Fournier, (1973). Application of Water Geochemistry to Geothermal and Reservoir Engineering, vol. 5, United States Geological Survey, Reston.
- Giggenbach, W. (1988). 'Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 52, pp 2749-2765.
- Hochstein, M.P and Brwone. (2000). *Surface Manifestation of Geothermal System With Volcanic Heat Sources*, In *Encyclopdia of Volcanoes*, Edit by H. Sigurdson. San Diego: Akademik Press: 835-865.
- NASA. (2020). SRTM-DEM. Entity ID: s08_e107_1arc_v3 (Online). Available: <https://earth.explorer.usgs.gov/>.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verslag Publ.276p.
- Truesdell, A.H. (1976). Summary of Section III. Geochemical Techniques in Exploration. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 53-79.