

# Karakteristik Geokimia Fluida Reservoir Pada Mata Air Panas Jengglong dan Pablengan, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah

Hurien Helmi, Hengky Kurniawan

Jurusan Teknik Geologi, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : hurien.helmi@itny.ac.id

## ABSTRAK

Kompleks Gunung Lawu Tua (pra-Lawu) dan Gunung Lawu Muda menyimpan potensi panasbumi yang menjanjikan untuk dieksploitasi. Hadirnya berbagai jenis manifestasi panas bumi baik di zona upflow dan outflow mengindikasikan keberadaan sistem panas bumi yang menarik untuk dikaji secara lebih rinci. Salah satu kajian yang perlu dilakukan adalah mengevaluasi karakteristik fluida reservoir panasbumi serta menentukan prakiraan temperatur fluida reservoir di sumber mata air panas Pablengan dan Jengglong. Pada penelitian ini dilakukan analisis peta geologi gunungapi, peta kerapatan kelurusan, dan analisis geokimia fluida panasbumi melalui diagram segitiga Cl<sup>-</sup>:SO<sub>4</sub><sup>-</sup>:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, diagram Cl<sup>-</sup>:B:Li dan Diagram segitiga Na:K:Mg serta analisis geotermometri untuk penentuan temperatur fluida resevoir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis fluida panasbumi untuk kedua mata air panas Pablengan dan Jengglong adalah air bertipe klorida (Chloride water) dan berasal dari suatu sistem panasbumi yang tua. Prakiraan temperatur fluida reservoir untuk mata air panas Pablengan yaitu berkisar antara 63°C- 155°C dan 84°C - 182°C untuk mata air panas Jengglong. Pemunculan mata air panas Jengglong di permukaan berasosiasi secara langsung dengan jalur sesar yang berada dekat dengan manifestasi sementara pemunculan mata air panas Pablengan tidak secara langsung berkaitan dengan jalur sesar karena berjarak relatif jauh dari zona sesar. Berdasarkan hasil penelitian kedua mata air panas tersebut memiliki potensi sumber panas yang baik di bawah permukaan dan layak untuk dikaji lebih lanjut dalam tahap eksplorasi panasbumi.

Kata kunci: panasbumi, geokimia, air panas, geothermometer, suhu

## ABSTRACT

*The old and young Lawu Mt complex exhibit significant geothermal manifestation indicate a promising geothermal potentials. The occurrence of geothermal manifestations around the volcano whether it is in the upflow and outflow zones may indicates the occurrence of geothermal system in the area and is an interesting subject to be investigated. We analyze the geochemistry characteristic of reservoir fluids at Pablengan and Jengglong hot springs to estimate the temperature at depth. We analyze the existing geological, lineament maps as well as conducting geochemistry analysis using Cl<sup>-</sup>:SO<sub>4</sub><sup>-</sup>:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>:B:Li, and Na:K:Mg triangle diagrams. Our analysis indicate that the type of the geothermal fluids for both springs is dominated by chloride water and came from an old geothermal system. We estimate a reservoir temperature of 63oC- 155oC for Pablengan and 84oC - 182oC for Jengglong spring. The Pablengan manifestation appears to be controlled by fault as it is located only 200 meters from mapped fault while the closest fault from Jengglong manifestation is located ~2km from the spring and does not directly controlled the manifestation. Our study indicate a promising temperature range at depth, more detailed analysis of the subsurface condition is necessary to reveal its full potentials.*

*Keyword : geothermal, geochemist, hot water, geothermometer, temperature*

## 1. PENDAHULUAN

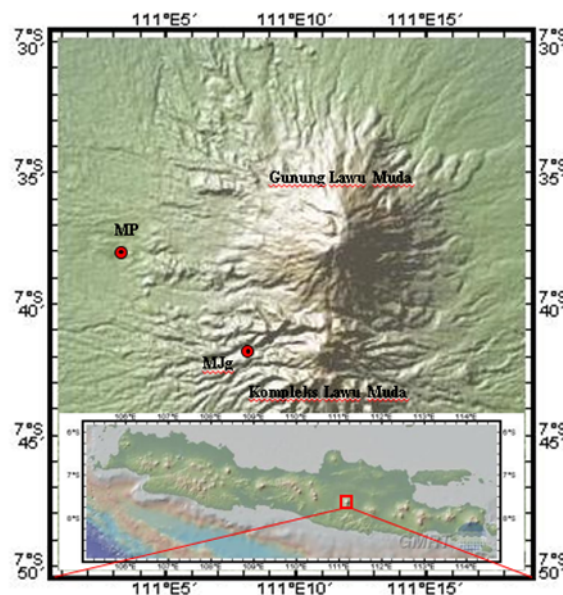
Indonesia berada pada zona tumbukan 3 lempeng yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Posisi ini menempatkan Indonesia pada rangkaian jalur gunung berapi dan tektonik aktif [1]. Adanya jalur aktif menjadikan wilayah Indonesia memiliki potensi panasbumi yang tinggi terutama adanya sumber energi panas sebagai unsur komponen penyusun sistem panasbumi. Besarnya potensi energi panasbumi di Indonesia diperkirakan mencapai 40% dari cadangan dunia. Salah satu wilayah yang diperkirakan memiliki sumber panasbumi yang tinggi adalah kawasan Gunung Lawu Muda dan Kompleks Lawu Tua (Gambar 1). Menurut data yang dirilis oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2017, energi panasbumi di kawasan Lawu diperkirakan mencapai 137 MWe dengan cadangan sekitar 195 MWe (terduga). Potensi panasbumi pada suatu wilayah umumnya dicirikan oleh keterdapatan manifestasi panasbumi seperti mata

fuida panas, fumarol dan batuan yang teralterasi. Adanya bukti-bukti keberadaan sistem panas bumi ini hanya dapat diperoleh melalui pemetaan geologi permukaan dan bawah permukaan secara rinci.

Berdasarkan peta geologi regional [2]& [3], struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian didominasi oleh struktur-struktur berupa sesar-sesar yang berarah barat-timur dan baratlaut-tenggara dengan struktur minor berarah baratdaya-timurlaut dan utara-selatan. Keberadaan sesar-sesar tersebut juga bisa diamati di dalam data topografi dan citra satelit berupa kelurusan-kelurusan. Hadirnya sesar-sesar tersebut diduga sebagai pengontrol munculnya sejumlah manifestasi panasbumi di sepanjang zona upflow dan outflow di Gunung api Lawu (Gambar 1).

Kondisi struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian relatif berarah barat-timur dan baratlaut-tenggara serta sebagian kecil berarah baratdaya-timurlaut dan utara-selatan. Keberadaan sesar-sesar tersebut juga teridentifikasi melalui analisis citra resolusi tinggi berupa kelurusan-kelurusan geologi yang arahnya relatif sama dengan kelurusan bidang-bidang sesar tersebut. Orientasi stuktur geologi yang berkembang di daerah penelitian tidak terlepas dari pengaruh perkembangan gaya tektonik regional pulau Jawa. Hadirnya sesar-sesar tersebut diduga sebagai pengontrol munculnya sejumlah manifestasi panasbumi di sepanjang zona upflow dan outflow tersebut (Gambar 1).

Berdasarkan peta geologi regional [2]& [3], struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian didominasi oleh struktur-struktur berupa sesar-sesar yang berarah barat-timur dan baratlaut-tenggara dengan struktur minor berarah baratdaya-timurlaut dan utara-selatan. Keberadaan sesar-sesar tersebut juga bisa diamati di dalam data topografi dan citra satelit berupa kelurusan-kelurusan. Hadirnya sesar-sesar tersebut diduga sebagai pengontrol munculnya sejumlah manifestasi panasbumi di sepanjang zona upflow dan outflow di Gunung api Lawu (Gambar 1).

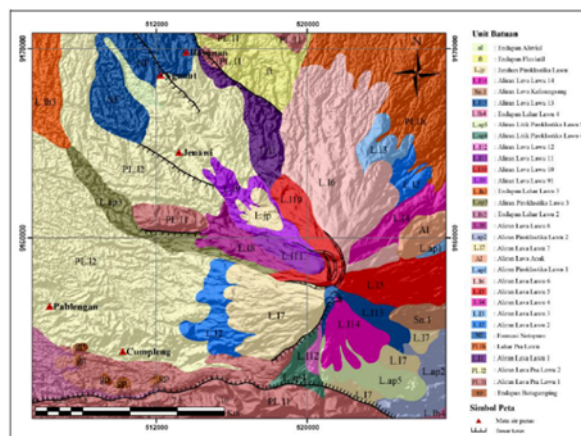


Gambar 1. Kaplingan daerah penelitian (garis kotak berwarna merah) dan lokasi pengambilan sampel air panas di mata air panas Pablengan (MP) dan Jengglong (MJg) (<https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/>).

Kondisi struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian relatif berarah barat-timur dan baratlaut-tenggara serta sebagian kecil berarah baratdaya-timurlaut dan utara-selatan. Keberadaan sesar-sesar tersebut juga teridentifikasi melalui analisis citra resolusi tinggi berupa kelurusan-kelurusan geologi yang arahnya relatif sama dengan kelurusan bidang-bidang sesar tersebut. Orientasi stuktur geologi yang berkembang di daerah penelitian tidak terlepas dari pengaruh perkembangan gaya tektonik regional pulau Jawa. Hadirnya sesar-sesar tersebut diduga sebagai pengontrol munculnya sejumlah manifestasi panasbumi di sepanjang zona upflow dan outflow tersebut.

Identifikasi lokasi sebaran panasbumi sebagai tahap awal eksplorasi panas bumi di daerah Gunung Lawu dan sekitar telah dilakukan melalui analisis penginderaan jauh antara lain melalui analisis citra Landsat 8 band thermal untuk menentukan lokasi sebaran panas di daerah gunung Lawu [3]& [4]. Beberapa peneliti lain juga mencoba melihat keterkaitan hubungan keberadaan stuktur geologi dengan sebaran daerah prospek panasbumi [5]berdasarkan sebaran struktur geologi permukaan dari analisa citra penginderaan jauh [6]. Kondisi bawah permukaan telah mencoba dilakukan oleh [7] dengan pengukuran resistivitas batuan dengan

metode audio magnetotelurik (AMT) di daerah Pablengan, kabupaten Karanganyar. Tipe jenis fluida, temperatur reservoir panasbumi juga telah diestimasi oleh beberapa peneliti, khususnya di Desa Pablengan [8] & [9]. Meskipun banyak penelitian yang telah dilakukan untuk memahami sistem panas bumi di Gunung Lawu, penelitian-penelitian yang terintegrasi belum banyak dilakukan. dan [10] telah menganalisis hubungan pemunculan mata air panas di kawasan Gunung Lawu dengan kondisi geologi yang terdapat di kawasan tersebut. Dalam penelitian ini kami mencoba untuk mengevaluasi kembali karakteristik fluida reservoir panasbumi meliputi jenis fluida panas bumi, temperatur fluida reservoir, asal usul fluida panasbumi serta aspek geologi lainnya yang berkaitan dengan keberadaan manifestasi mata air panas Pablengan dan Jengglong.



Gambar 2. Peta lokasi sumber fluida panasbumi daerah Gunung Lawu dengan latar belakang berupa Peta Geologi Gunung Api Lawu (modifikasi dari Abdurachman dkk [2])

## 2. METODE PENELITIAN

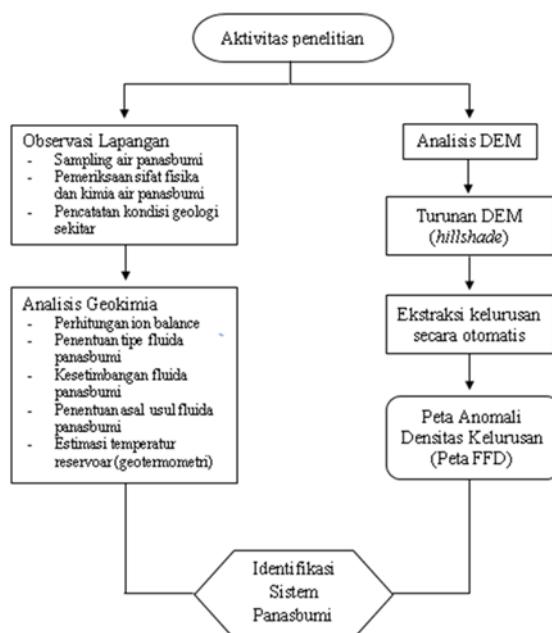
Penelitian ini meliputi dua aktivitas utama yaitu kegiatan lapangan dan studio. Kegiatan lapangan meliputi pemeriksaan dan pengambilan sampel fluida panasbumi serta pencatatan kondisi geologi di area sekitar manifestasi panasbumi terkait litologi dan kondisi sekitar. Tahapan pemeriksaan fluida panasbumi meliputi pengukuran sifat fisika dan kimia fluida panasbumi langsung di lapangan. Evaluasi sifat fisika fluida panasbumi mencakup pengukuran temperatur mata air panasbumi, pemeriksaan warna dan bau fluida panasbumi, daya hantar listrik (DHL) serta debit fluida panasbumi. Sedangkan pengukuran sifat kimia fluida panasbumi mencakup pengukuran derajat keasaman (pH), jumlah total padatan terlarut (total dissolved solids/TDS), salinitas serta pengukuran konduktivitas listrik/electrical conductivity (EC).

Teknis pengambilan sampel fluida panasbumi di mata air panas mengikuti standar prosedur pengambilan sampel fluida yang telah direkomendasikan oleh [11]. Contoh fluida yang telah diambil, kemudian disaring dan dimasukkan ke dalam botol contoh untuk uji laboratorium. Botol contoh fluida yang akan dianalisis ion-ion bermuatan positif (kation) ditambahkan larutan pengawet berupa asam klorida pekat (HCl pekat) dengan tujuan untuk mengikat unsur-unsur terlarut yang terkandung di dalam botol contoh fluida panasbumi, sementara botol contoh fluida yang akan dianalisis ion-ion bermuatan negatif (anion) tidak diperlakukan penambahan larutan pengawet, namun hanya diperlakukan pendinginan pada sampel fluida. Pada penelitian ini, kandungan ion yang bermuatan positif yang akan dianalisis meliputi unsur  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Li}^{+}$ , dan  $\text{NH}_4^{+}$ , sedangkan konsentrasi ion yang bermuatan negatif berupa unsur  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$  dan  $\text{F}^{-}$ . Hasil analisis kandungan anion tersebut dimanfaatkan untuk memahami tipe dan komposisi kimia fluida panasbumi, penentuan kedalaman reservoir, sistem hidrologi dan geotermometri fluida.

Penentuan tipe fluida panasbumi dilakukan dengan memplotkan persentase masing-masing anion utama pada diagram segitiga  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$  [12]. Penentuan asal fluida panas bumi dilakukan dengan memplotkan kandungan konsentrasi relatif masing unsur konservatif (Cl dan B) dan Li pada diagram segitiga  $\text{Cl-Li-B}$  [13]. Unsur-unsur konservatif tersebut merupakan unsur yang tetap di dalam fase fluida dan tidak mengalami kesetimbangan sehingga merupakan sebagai geoindikator yang baik dalam memahami asal mula sistem panasbumi. Fluida panasbumi memiliki konsentasi Cl yang tinggi terhadap Li dan B mengindikasikan bahwa air tersebut berasal dari sistem hidrotermal yang tua dan air tersebut bermigrasi dari batuan basemen yang tua. Evaluasi tingkat pencapaian kesetimbangan fluida-batuan diperoleh dengan memanfaatkan metode grafik pada diagram segitiga  $\text{K-Mg-Na}$  yang telah direkomendasikan oleh [12]. Hasil pengeplotan parameter unsur pada diagram segitiga tersebut dipakai untuk mengindikasikan kondisi

kesetimbangan fluida-batuan dan memperkirakan temperatur fluida panasbumi di bawah permukaan. Estimasi temperatur fluida reservoir ditentukan dengan menggunakan metode geotermometri dan diagram segitiga Na-K-Mg.

Identifikasi keberadaan struktur geologi yang analisis kelurusan yang berasosiasi dengan keberadaan struktur dilakukan dengan menggunakan metode Fault and Fracture Density (FFD). Prinsip dasar metode FFD adalah mengevaluasi area dengan tingkat kepadatan struktur yang tinggi, terbentuk akibat interkoneksi sesar dan rekahan pada batuan. Sesar yang terbentuk bersifat tektonik sehingga rekahan yang berkembang pada deformasi batuan terjadi akibat proses tektonik, misalnya sesar dan perlipatan. Peta kerapatan sesar dan kekar (FFD) diperoleh melalui ekstraksi otomatis kelurusan morfologi (kelurusan morfologi sungai, lembah, dan bukit [14]. Data yang digunakan untuk ekstraksi deteksi kelurusan adalah data model ketinggian digital (DEM) yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial, Indonesia (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>). Data model ketinggian digital diolah dan diproses melalui perangkat komputer dan perangkat lunak ArcMap untuk menghasilkan peta densitas kelurusan secara otomatis [15]. Peta anomali densitas kelurusan merepresentasikan berbagai jenis gejala atau fenomena seperti struktur geologi, perbedaan litologi maupun antropogenik [10]. Nilai anomali densitas kelurusan yang tinggi di area sekitarnya mengindikasikan daerah tersebut memiliki kerapatan pola struktur yang rapat dan umumnya berasosiasi dengan zona permeabilitas tinggi [10].



Gambar 3. Diagram alir penelitian meliputi proses pengambilan data lapangan dan pengolahan data

### 3. HASIL

Pada penelitian ini, lokasi kedua sumber mata air panas terletak pada khuluk gunung api yang berbeda. Mata air panas pablengan terletak di desa pablengan, kecamatan matesih, kabupaten karanganyar, jawa tengah. Mata air panas ini berada di sisi barat kaki gunung lawu muda. Sementara, mata air panas jengglong terletak di dukuh jengglong, desa wonorejo, kecamatan jatiyoso, kabupaten karanganyar, jawa tengah dan berada di sisi barat laut kompleks lawu tua. Detil lokasi pengambilan sampel fluida panasbumi dapat dilihat pada gambar 1 dan 2.

#### 3.1. Geologi daerah penelitian

Mata air panas pablengan dan jengglong terletak pada kawasan gunung lawu muda dan pra lawu (kompleks lawu tua) yang berumur kuartar [2]. Mata air panas pablengan yang muncul di permukaan, ditemukan pada unit aliran lava pra-lawu 2 (pl.i2) dan satuan ini terdiri atas unit lava andesit piroksen yang telah mengalami pelapukan kuat. Sementara mata air panas jengglong yang keluar di permukaan didapati pada satuan aliran lava pra-lawu 1 (pl.i1) dan tersusun atas singkapan lava andesit piroksen [2].

berdasarkan peta Geologi Gunung Lawu [2], struktur geologi yang dijumpai di kawasan endapan gunung lawu muda berupa sesar-sesar turun diperkirakan yang berorientasi relatif barat-laut-tenggara dan sesar tersebut umumnya berada di sebelah barat-laut/utara gunung lawu muda, sedangkan sesar turun

diperkirakan yang berarah relatif barat-timur berkembang pada endapan kompleks pra lawu, yang terletak di sebelah selatan gunung lawu muda atau sebelah utara kompleks pra lawu. Sesar minor diperkirakan dengan mekanisme pergerakan turun dijumpai di sekitar area puncak gunung lawu muda dengan arah relatif utara-selatan (gambar 1).

Berdasarkan hasil analisis peta Geologi Gunung Lawu menunjukkan bahwa lokasi munculnya manifestasi panasbumi relatif berdekatan dengan keberadaan jalur-jalur sesar turun, terutama manifestasi yang berada di sisi bagian barat laut daerah penelitian. Beberapa lokasi mata air panas yang berjarak relatif dekat dengan jalur bidang sesar yakni mata air panas Jenawi, Bayanan dan Ngunut, dimana jaraknya berkisar antara  $\pm 200-700$  meter. Sedangkan lokasi mata air panas lainnya berjarak relatif jauh dari jalur bidang sesar, misalnya mata air panas Cempleng berjarak sekitar  $\pm 2,5$ -kilometer dan mata air panas Pablengan berjarak lebih jauh lagi sekitar  $\pm 5$ -kilometer dari jalur bidang sesar. Secara umum munculnya mata air panas di sisi lereng kaki bagian barat gunung api lawu berada di bagian zona yang turun (downthrown side) dari sesar-sesar turun yang berkembang di daerah penelitian.

### 3.2. Karakteristik Mata Air Panas

Pemeriksaan sifat fisika dan kimia fluida panas bumi pada kedua mata air panas dapat dilihat pada Tabel 1. Karakteristik fluida panasbumi pada mata air panas Pablengan menunjukkan warna air yang jernih dengan aroma sulfur tidak terlalu kuat, pH 6.52 (mendekati netral) dan temperatur berkisar  $\pm 35$ o C, sementara karakteristik fluida panasbumi pada mata air panas Jengglong berwarna jernih dengan sedikit beraroma sulfur, memiliki temperatur  $\pm 36,8$ o C, dan pH 6.69 (netral). Di area sekitar pinggiran kolam mata air panas Jengglong dan Pablengan ditemukan endapan limonit yang mengandung Fe-oxide tinggi, diindikasikan oleh endapan batuan berwarna coklat emas.

Tabel 1. Karakteristik sifat fisika dan kimia fluida panasbumi

Parameter Uji	Lokasi Pengambilan Sampel	
	Jengglong	Pablengan
Fluida		
Warna	Jernih	Jernih
Bau	Bau sulfur tidak terlalu kuat	Bau sulfur tidak terlalu kuat
pH	6.69	6.52
Temperatur air (°C)	36,8	35
Temperatur udara (°C)	29,8	28
Kelembaban (%)	59	62
TDS (ppm)	16008	8616
DHL	17580	11480
Manifestasi	endapan limonit	endapan limonit

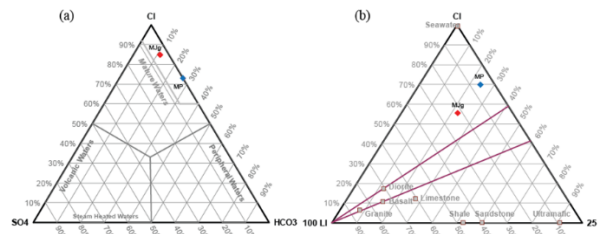
### 3.3. Geokimia fluida panasbumi

Hasil analisis pengujian laboratorium terhadap konsentrasi unsur-unsur anion dan kation sampel fluida panasbumi terlihat pada tabel 2. Terdapat 4 (empat) klasifikasi jenis fluida panasbumi yang dapat ditentukan dari pengeplotan diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> yaitu, volcanic waters, steam heated waters, peripheral waters dan mature waters. Penentuan klasifikasi jenis fluida panasbumi ditentukan dengan menghitung proporsi relatif anion utama yang terkandung di dalam fluida panasbumi dalam bentuk prosentase, dan kemudian memplotkannya pada diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> [12]. Hasil pengeplotan prosentase ketiga elemen Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> dan HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> untuk kedua sumber mata air panas terletak pada bagian sisi garis Cl-SO<sub>4</sub> dari diagram segitiga, dekat dengan puncak Cl<sup>-</sup> (kaya kandungan Cl<sup>-</sup>) dan termasuk ke dalam zona mature waters (gambar 3).

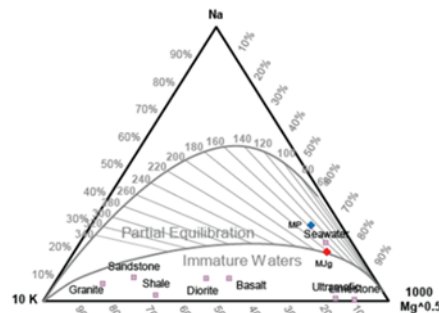
Tabel 2. Kandungan konsentrasi unsur anion dan kation fluida panasbumi

Parameter	Pablengan	Jegglong
pH	6,8	6,7
Ca <sup>2+</sup> (m g/L)	165,73	1308,56
Mg <sup>2+</sup> (m g/L)	47,38	217,18
Na <sup>+</sup> (m g/L)	2985,30	3637,20
K <sup>+</sup> (m g/L)	94,87	180,02
Fe <sup>3+</sup> (m g/L)		13,35
Li <sup>+</sup> (m g/L)	3,87	31,03
NH <sup>+</sup> (m g/L)	15,85	16,15
F <sup>-</sup> (m g/L)	0,1856	0,0308
Cl <sup>-</sup> (m g/L)	4544	7881
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (m g/L)	0,20	351,02
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (m g/L)	1675,98	1052,44
Cl <sup>-</sup> (%)	73	85
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)	0	4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (%)	27	11
Ion Balance (%)	3	1

Diagram segitiga Chloride (Cl), Lithium (Li) dan Boron (B) [13] merupakan salah satu metode yang baik dalam memahami asal usul fluida panasbumi. Ketiga unsur ini, Cl, Li dan B merupakan unsur-unsur konservatif (conservative elements) yang terkandung di dalam sistem fluida panasbumi [16]. Pada fase cair, unsur-unsur tersebut berada tetap di dalam cairan, tidak mengalami kesetimbangan dan berperan sebagai geoindikator dalam penentuan asal usul air dalam sistem panasbumi. Hasil pengeplotan ketiga elemen pada diagram segitiga tersebut dapat menyingkap fraksinasi yang terjadi terkait proses boiling atau mixing yang disebabkan oleh pendidihan fluida atau fluida yang dihasilkan dari berbagai macam sumber uap (steam) [18]. Hasil pengeplotan ketiga unsur jejak yang terkandung di dalam dua sampel mata air panas berada pada kondisi absorpsi uap B/Cl yang rendah (absorption of low B/Cl steam) dengan rasio B/Cl masing-masing sampel mata air panas Pablengan dan Jegglong adalah 34 dan 42 (Gambar 3).



Gambar 4. Menunjukkan hasil pengeplotan persentase anion utama pada diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (Giggenbach, 1988) (a) dan Diagram segitiga Cl-Li-B (Giggenbach, 1991a) (b) menunjukkan bahwa kedua mata air panas Pablengan (MP) dan Jegglong (MJg) didominasi oleh Cl



Gambar 5. Pengeplotan diagram segitiga Na, K dan Ca (Giggenbach, 1991). Fluida pada daerah penelitian umumnya berada pada zona partial equilibrium. Hal ini menunjukkan bahwa fluida merupakan mature water yaitu kemungkinan fluida berasal langsung dari reservoir dengan temperatur tinggi dengan tingkat kontaminasi air permukaan rendah

Diagram segitiga lainnya yang digunakan untuk memahami sistem panasbumi yaitu plot diagram segitiga Na-10K-1000Mg<sup>1/2</sup> yang direkomendasikan oleh [13]. Plot diagram segitiga ini dapat dipakai untuk mengidentifikasi air panasbumi, apakah air tersebut telah mencapai kesetimbangan dengan tubuh batuan induk yang telah ditempatinya (host litology). Berdasarkan pengeplotan data geokimia pada diagram segitiga Na-10K-1000Mg<sup>1/2</sup>, kedua sampel mata air panas tersebut berada zona partial equilibrium (mixed) dan mendekati bagian titik puncak (vertex) konsentrasi Mg (Gambar 3).

**3.4. Estimasi Temperatur Reservoir Panasbumi**

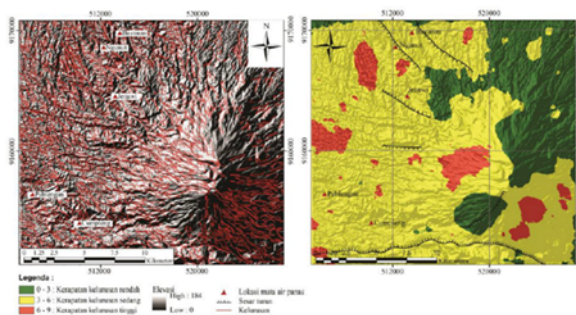
Prakiraan temperatur reservoir bawah permukaan ditentukan dengan menggunakan persamaan geotermometer kation dan silika. Secara konseptual, penentuan persamaan geotermometer untuk menghitung prakiraan temperatur bawah permukaan dengan mempertimbangkan kandungan unsur-unsur terlarut yang terkandung di dalam sampel mata air panas. Dalam penelitian ini, perhitungan temperatur reservoir memakai persamaan geotermometer seperti yang terlihat di Tabel 3. Hasil perhitungan prakiraan temperatur reservoir (bawah permukaan) dengan menggunakan persamaan geotermometer pada tabel 3 untuk setiap sumber mata air panas menunjukkan nilai temperatur reservoir bervariasi dengan rentang nilai yang cukup besar, yaitu berkisar 63o C-155o C untuk temperatur bawah permukaan mata air panas Pablengan dan 84o C-182o C untuk temperatur bawah permukaan mata air panas Jengglong (Tabel 3). Plot diagram segitiga Na-10K-1000Mg<sup>1/2</sup> selain berperan untuk mengenali kesetimbangan air panasbumi dengan batuan induk yang ditempati, juga dapat berfungsi untuk memprakirakan kondisi temperatur reservoir di bawah permukaan. Estimasi temperatur reservoir panasbumi dilakukan dengan menggunakan plot diagram geotermometri kation, yaitu kombinasi geotermometer sodium-potassium (Na-K) dan geotermometer potassium-magnesium ((K-Mg) [17]. Berdasarkan hasil pengeplotan data sampel kedua mata air panas menunjukkan bahwa prakiraan temperatur reservoir untuk sumber mata air panas Pablengan berkisar ± 180o C dan mata air panas Jengglong berkisar antara 170o C-180o C (Gambar 3).

Tabel 1. Estimasi temperatur reservoir mata air panas Pablengan dan Jengglong

Geotermometer	Na-K-Ca	Na-K-Mg corr	Na/K Fournier 1979	Na/K Truesdell 1976	Na/K Giggenbach 1988	Na/K Tonani 1980	Na/K Nieva & Nieva 1987	Na/K Arnorsson 1983	K/Mg Giggenbach 1986
Pablengan	153	63	135	90	155	114	124	101	105
Jengglong	161	84	163	122	182	150	151	133	101

**3.5. Peta Kerapatan Kelurusan (Lineament Density Map)**

Hasil analisis peta kerapatan kelurusan mengindikasikan bahwa kedua mata air panas Pablengan dan Jengglong berada pada zona dengan nilai kerapatan sedang (ditunjukkan oleh zona kerapatan berwarna kuning hingga merah) (Gambar 6). Hasil observasi peta geologi gunung Lawu mengindikasikan bahwa sesar-sesar normal yang teramati pada kawasan Gunung Lawu Muda dan kompleks Lawu Tua terdapat pada area dengan nilai kerapatan kelurusan sedang (area berwarna kuning hingga merah) (Gambar 6).



Gambar 6.a) Peta Kelurusan dan (b) Peta kerapatan kelurusan Gunung Lawu Muda dan Kompleks Gunung Lawu Tua

**4. DISKUSI**

Hasil kajian peta Geologi Gunung Api Lawu yang dipublikasikan oleh [2] dan data sebaran struktur geologi yang telah diterbitkan oleh [18] mengindikasikan bahwa mata air panas Pablengan terletak sekitar ~ 3.2 km ke arah barat laut dari jalur sesar normal diperkirakan dan secara topografi berada pada sisi blok turun

dari suatu bidang sesar (downthrown side). Kemunculan sumber mata air panas ini yang berjarak relatif jauh dari zona sesar menunjukkan bahwa kehadiran manifestasi tersebut tidak berkaitan secara langsung dengan zona sesar tersebut [10]. Namun munculnya mata air panas Pablengan berkaitan dengan adanya zona rekahan (kekar) yang terdapat pada batuan, hal ini teramati pada peta kerapatan kelurusan dengan nilai anomali yang sedang (Gambar 5) yang mengindikasikan keterdapatannya rekahan intensitas sedang yang berasosiasi dengan dengan zona rekahan. Manifestasi mata air panas Jengglong yang terletak di selatan daerah penelitian, berjarak sekitar ~ 220 m ke arah tenggara dari jalur bidang sesar normal diperkirakan, berada di sisi blok turun (downthrown side) dari suatu bidang sesar (Gambar 5). Kemunculan mata air panas Jengglong yang berjarak relatif berdekatan dengan jalur sesar normal diperkirakan, diinterpretasikan bahwa munculnya mata air panas tersebut berkaitan secara langsung dengan jalur sesar normal diperkirakan, atau kekar yang terdapat pada batuan penyusun hanging wall (blok turun) yang terbentuk akibat pergerakan relatif sesar turun [10]. Kekar tersebut memiliki kemampuan untuk meloloskan fluida panasbumi dan teramati pada peta kerapatan kelurusan nilai anomali kerapatan sedang mendekati tinggi (Gambar 5).

Hasil pengeplotan prosentase unsur Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> dan HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> mata air panas Pablengan (MP) dan mata air panas Jengglong (MJg) pada diagram segitiga Cl<sup>-</sup>--SO<sub>4</sub><sup>-</sup>--HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> mengindikasikan bahwa kedua mata air panas terletak di dalam zona mature waters, tepatnya di sekitar area garis Cl<sup>-</sup>--HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Kandungan konsentrasi klorida (Cl<sup>-</sup>) pada kedua mata air panas relatif tinggi, mengindikasikan bahwa fluida panasbumi mengalir langsung dari reservoir bawah permukaan (deep reservoir) ke permukaan dengan sedikit atau tanpa pencampuran atau pendinginan konduktif (mixing or conductive cooling). Tingginya konsentrasi Cl<sup>-</sup> juga memberikan petunjuk adanya sedikit pengaruh pencampuran antara air laut dan fluida panasbumi (thermal fluids). Berdasarkan dominasi konsentrasi anion utama fluida panas bumi yang diplot pada diagram segitiga Cl<sup>-</sup>--SO<sub>4</sub><sup>-</sup>--HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> memperlihatkan bahwa fluida panasbumi bersifat air klorida dengan sedikit kandungan konsentrasi sulfat dan bikarbonat.

Kehadiran litium (Li) dalam fluida panasbumi dapat mengindikasikan adanya migrasi fluida panas yang berasal dari sumber panasbumi paling dalam di bawah permukaan. Sementara, munculnya boron menunjukkan ada proses pencucian (leaching) pada bagian dinding batuan, terjadi akibat interaksi antara fluida panasbumi dan batuan sesaat fluida melewati batuan melalui media rekahan atau rongga pori-pori batuan. Hasil pengeplotan unsur klorida, litium dan boron pada diagram segitiga Cl<sup>-</sup>--Li--B dari dua sampel mata air panas terletak pada zona absorpsi uap B/Cl rendah (absorption of low B/Cl steam), yang memberikan petunjuk bahwa fluida berasal dari sistem panasbumi yang berumur tua. [19] & [20]

Pengeplotan unsur Na, K dan Mg setiap sampel fluida panasbumi pada plot diagram segitiga Na-10K-1000Mg1/2 menunjukkan bahwa sampel fluida mata air panas Pablengan terletak di atas kurva immature waters, berada dalam zona partial equilibrium (mixed) dan sampel fluida mata air panas Jengglong terletak segaris dengan garis kurva immature waters. Kedua sampel mata air panas ini dikelompokkan sebagai fluida panasbumi yang telah mencapai kesetimbangan sebagian/parsial (partial equilibrium). Jenis kesetimbangan fluida panasbumi ini dapat mengindikasikan proses reaksi kesetimbangan yang terjadi antara fluida panasbumi dan batuan berupa proses pelarutan mineral (dissolution of mineral), atau menandakan bahwa telah terjadi reaksi kesetimbangan namun kesetimbangan tersebut belum tercapai, atau menggambarkan telah terjadinya pencampuran antara fluida panasbumi yang telah tercapai kesetimbangan dengan air dekat permukaan yang bersifat encer dan belum tercapai kesetimbangan, misalnya air tanah yang dingin. Prakiraan temperatur reservoir dengan menggunakan metode plot diagram segitiga Na-10K-1000Mg1/2 menunjukkan temperatur reservoir pada mata air panas Pablengan berkisar ± 180o C dan mata air panas Jengglong berkisar antara 170o C-180o C. Berdasarkan estimasi temperatur bawah permukaan tersebut maka daerah penelitian dapat dikategorikan sebagai sistem panasbumi bertemperatur tinggi dan berpotensi sebagai penghasil sumber panas.

## 5. KESIMPULAN

Hasil analisis geokimia fluida panas bumi mata air panas Pablengan dan Jengglong diklasifikasikan sebagai tipe air klorida. Tipe air klorida (Cl<sup>-</sup>) pada suatu manifestasi dapat mengindikasikan bahwa fluida panasbumi mengalir langsung dari reservoir bawah permukaan (deep reservoir) menuju ke permukaan dengan sedikit atau tanpa pencampuran atau pendinginan konduktif (mixing or conductive cooling). Tingginya konsentrasi Cl<sup>-</sup> juga memberikan petunjuk adanya sedikit pengaruh pencampuran antara air laut dan fluida panasbumi (thermal fluids). Keberadaan unsur litium (Li) dalam fluida panasbumi menunjukkan adanya migrasi fluida panas yang berasal dari sumber panasbumi yang aling dalam (jauh di bawah permukaan) dan hadirnya boron mengindikasikan adanya ada proses pencucian (leaching) yang terjadi pada bagian dinding batuan. Hal ini terbentuk akibat interaksi antara fluida panasbumi dan batuan sesaat fluida melewati batuan. Pengeplotan pada diagram segitiga Cl<sup>-</sup>--Li--B kedua sampel mata air panas terletak pada zona absorpsi uap B/Cl rendah (absorption of low B/Cl steam) sehingga dapat diinterpretasikan bahwa fluida berasal dari sistem panasbumi yang berumur relatif tua. Mata air panas Jengglong berjarak relatif dekat



dengan jalur sesar normal diperkirakan sehingga ada keterkaitan langsung dengan kemunculan manifestasi namun tidak ada kaitan antara kemunculan mata air panas Pablengan dengan sesar yang ada.

Prakiraan temperatur fluida reservoir (bawah permukaan) menunjukkan nilai temperatur fluida reservoir yang bervariasi, yaitu berkisar 63oC-155oC untuk mata air panas Pablengan dan 84o C-182o C untuk mata air panas Jengglong. Berdasarkan hasil pengeplotan diagram segitiga Na-10K-1000Mg<sup>1/2</sup> kedua mata air panas menunjukkan bahwa prakiraan temperatur reservoir untuk sumber mata air panas Pablengan berkisar ± 180o C dan mata air panas Jengglong berkisar antara 170o C-180o C.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendanai pelaksanaan kegiatan penelitian dan Rektor ITNY yang telah menyetujui pembiayaan penelitian. Peneliti juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengambilan data lapangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] HAMILTON, Warren Bell. *Tectonics of the Indonesian region*. US Government Printing Office, 1979.
- [2] ABDURACHMAN, K, dkk, t.t., Peta Geologi Gunungapi Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Direktorat Vulkanologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Indonesia., t.t.
- [3] HARIYANTO, Teguh; ROBAWA, Farrel Narendra. Identifikasi Potensi Panas Bumi Menggunakan Landsat 8 Serta Penentuan Lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (Studi Kasus: Kawasan Gunung Lawu). *Geoid*, 2016, 12.1: 36-42
- [4] AMALISANA, Birohmatin; PIN, Tjong Giok; SARASWATI, Ratna. Penentuan potensi panas bumi menggunakan Landsat 8 dan hubungannya dengan kondisi geologi Gunung Lawu. In: *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*. 2017. p. 300-305.
- [5] DWI YUDA WAHYU SETYA PAMBUDI, Dwi Yuda Wahyu, et al. Delineasi daerah prospek panas bumi berdasarkan kelurusan citra landsat dan digital elevation model (DEM) daerah Gunung Lawu, Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur. In: *PROSIDING SEMINAR NASIONAL KEBUMIHAN KE-7 Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, 30–31 Oktober 2014*. Jurusan Teknik Geologi, 2014.
- [6] SIAGIAN, Rinaldo; MARYUDI, Muhamad; PURBA, Verilla. Integrated Research For Geothermal Prospect Zone Of Lawu Mountain Based On Geothermal Manifestation, Rock Alteration, and Geochemical Analysis Of Fluid, Fault Fracture Density And Magnetotelluric Data. In: *ASEAN/Asian Academic Society International Conference Proceeding Series*. 2018. p. 595-604.
- [7] SATRIO, Ardiyanto; KOESUMA, Sorja. Identifikasi Panasbumi di Daerah Ngijo dan Pablengan Karanganyar Menggunakan Metode Audio Magnetotelurik. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 2012, 2.2: 1-7.
- [8] WAHYU WILOPO, Wahyu Wilopo; KUSUMA DHILAGA, Kusuma Dhilaga. GENESA MATA AIR DI DAERAH PABLENGAN–CUMPLENG, KECAMATAN MATESIH–TAWANGMANGU, KABUPATEN KARANGANYAR, PROPINSI JAWA TENGAH. In: *PROSIDING SEMINAR NASIONAL KEBUMIHAN KE-7 Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, 30–31 Oktober 2014*. Jurusan Teknik Geologi, 2014.
- [9] WOWA, Fadri; WILOSO, Danis Agoes. Studi Geokimia Untuk Pendugaan Suhu Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Analisis Solute Geothermometer Di Desa Pablengan, Kecamatan Matesih, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. In: *PROCEEDING, SEMINAR NASIONAL KEBUMIHAN KE-10 PERAN PENELITIAN ILMU KEBUMIHAN DALAM PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA 13–14 SEPTEMBER 2017; GRHA SABHA PRAMANA*. 2017.
- [10] HELMI, Hurien; KURNIAWAN, Hengky; ADAM, Widi. KONTROL GEOLOGI TERHADAP PEMUNCULAN MANIFESTASI PANASBUMI DI KAWASAN GUNUNG LAWU. *KURVATEK*, 2020, 5.1: 1-9.
- [11] KEITH, Nicholson. *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques*. 1993.
- [12] GIGGENBACH, Werner F. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1988, 52.12: 2749-2765.
- [13] GIGGENBACH, W. F. Chemical techniques in geothermal exploration. Application of geochemistry in geothermal reservoir development, 1991, 119-144.
- [14] RADAIDEH, Omar MA, et al. Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS: An example in SW Jordan. *Geomorphology*, 2016, 275: 58-79
- [15] NUGRAHA, Husin Setia, et al. COMPARISON OF APPLICATION FAULTS AND FRACTURE DENSITY (FFD) METHOD USING SRTM 90-M, SRTM 30-M AND ASTER GDEM 30-M FOR GEOTHERMAL EXPLORATION: A CASE OF ILE ANGE PROSPECT.

- 
- [16] STRELBITSKAYA, Svetlana; RADMEHR, Behnam. Geochemical characteristics of reservoir fluid from NW-Sabalan geothermal field, Iran. In: Proceedings world geothermal congress. 2010. p. 25-29.
- [17] SHAH, Manan, et al. Comprehensive geochemical/hydrochemical and geo-thermometry analysis of Unai geothermal field, Gujarat, India. *Acta Geochimica*, 2019, 38.1: 145-158.
- [18] Direktorat Panas Bumi, Ditjen EBTKE Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Badan Geologi, ISBN 978-602-50394-0-9, Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1, Direktorat Panas Bumi Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Agustus 2017, Jl. Pegangsaan Timur No. 1 Menteng, Jakarta 10320.
- [19] URZUA, Luis, et al. Apacheta, a new geothermal prospect in northern Chile. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2002.
- [20] POWELL, Tom; CUMMING, William. Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry. In: Proceedings. 2010. p. 4-6.
- [21] Tersedia: <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php> [Diakses: 25 April 2020].