

KONTROL GEOLOGI TERHADAP PEMUNCULAN MANIFESTASI PANASBUMI DI KAWASAN GUNUNG LAWU

Hurien Helmi, Hengky Kurniawan, Widi Adam
Program Studi Teknik Geologi, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta
Email: hurien.helmi@itny.ac.id

Abstrak

Gunung Lawu memiliki potensi panasbumi yang menjanjikan untuk dieksploitasi. Keberadaan berbagai jenis manifestasi dikawasan gunungapi tersebut mengindikasikan keberadaan sistem panas bumi di daerah ini yang perlu diteliti secara lebih rinci. Salah satu kajian yang perlu dilakukan adalah mengetahui faktor pengontrol pemunculan manifestasi panasbumi di kawasan gunung Lawu sehingga model sistem panas bumi bisa disusun dengan baik. Pada penelitian ini dilakukan analisis peta geologi gunungapi, kerapatan kelurusan, dan geokimia air untuk mengetahui kaitan antara kondisi geologi, terutama struktur geologi, terhadap pemunculan air panas di kawasan Gunung Lawu. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa pemunculan manifestasi panasbumi di Gunung Lawu tidak berasosiasi secara langsung dengan jalur sesar-sesar turun utama yang berkembang di daerah penelitian. Analisa kerapatan kelurusan juga tidak menunjukkan korelasi yang signifikan antara nilai kerapatan tinggi dengan jalur sesar-sesar turun yang telah dipetakan sebelumnya. Jalur sesar-sesar tersebut berada pada nilai kerapatan kelurusan sedang. Hal ini menunjukkan bahwa nilai kerapatan kelurusan yang tinggi lebih banyak dipengaruhi oleh aspek morfologi yang didominasi oleh proses-proses di permukaan. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa kemunculan manifestasi panasbumi di Gunung Lawu dikontrol terutama oleh keberadaan zona rekahan dan kekar yang diindikasikan oleh nilai kerapatan kelurusan sedang. Analisis geokimia air mendukung interpretasi tersebut dimana tipe air panas bumi yang muncul pada mata air panas Cumpleng dan Ngunut menunjukkan tipe air bikarbonat yang dicirikan oleh hadirnya endapan limonit dan travertin. Tipe fluida panasbumi dan endapan mineral ubahan tersebut biasanya berasosiasi dengan keberadaan rekahan dan kekar dibawah atau dekat permukaan.

Kata kunci: struktur geologi, geokimia air, kelurusan, Lawu, mata air panas

Abstract

Gunung Lawu exhibit a prominent geothermal manifestation indicate promising geothermal potentials. The occurrence of geothermal manifestations around the volcano indicates the occurrence of geothermal system in the area. Further detail investigations are required to confirm the occurrence of a well established geothermal system. Information about the geological factors controlling the geothermal manifestation is crucial to understand the geothermal system in an area. We analyze the previously available geological maps, lineament density, and geochemical analysis of the hot springs in the area of Mt. Lawu to understand the correlation between the geological condition, especially the structural geology and the geothermal manifestation. Our results indicate that the occurrence of the geothermal manifestations in the area is not directly correlated with the mapped major normal faults, but instead with the minor fracture regions. The lineament fractal density analysis also indicate that the high fractal density value does not coincide with the faults. The faults are located in the regions of medium fractal density. It is likely that the high lineament fractal density is mostly controlled by surface processes instead of representing tectonic significance. The occurrence of the geothermal manifestations is located in the medium lineament density value, which may represent areas with minor fractures. Geochemical analysis supports this interpretation, analysis of the geochemistry of the samples taken from Cumpleng and Ngunut hot springs shown bicarbonate-type. We also observe the presence of limonite and travertin deposits. This type of geothermal fluids and mineral deposits are commonly associated with the presence of fractures and cracks below or near the surface.

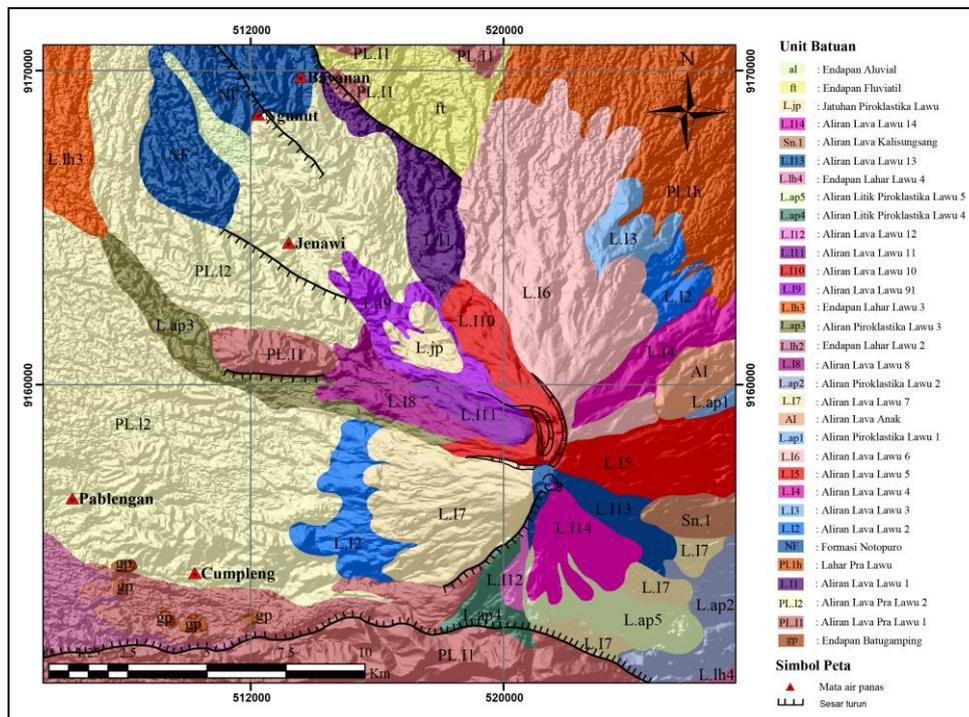
Keywords: structural geology, water geochemistry, lineament density, Lawu, hot springs

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 gunung api 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. 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 air 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], 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 Gunungapi Lawu (Gambar 1).



Gambar 1. Peta lokasi sumber air panasbumi daerah Gunung Lawu dengan latar belakang berupa Peta Geologi Gunungapi Lawu (modifikasi dari Abdurachman dkk [2])

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 gunung api tersebut (Gambar 1).

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] dan berdasarkan sebaran struktur geologi permukaan dari analisa citra penginderaan jauh [6]. Kondisi bawah permukaan telah mencoba dilakukan oleh Satrio dan Koesuma [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. Pada penelitian ini, kami mencoba melakukan integrasi antara data geokimia airpanas yang kami ambil dengan data analisa kelurusan, dan peta geologi yang sudah ada sebelumnya dengan tujuan untuk mengetahui faktor geologi yang mengontrol pemunculan mata air panas di wilayah gunung Lawu. Harapan kami penelitian ini bisa memberikan pemahaman yang lebih baik tentang faktor pengontrol kemunculan air panas di gunung Lawu sehingga sistem panas bumi gunung Lawu bisa dipahami dengan lebih baik.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, kami melakukan analisa yang mengintegrasikan hasil-hasil penelitian yang sudah ada sebelumnya. Selain itu kami juga melakukan pengambilan data langsung di lapangan yang meliputi pengamatan kondisi geologi dan manifestasi, serta pengambilan sampel air untuk analisa geokimia air di laboratorium. Tahapan penelitian yang kami lakukan meliputi pengamatan kondisi geologi, pemeriksaan sifat fisik air, pengambilan sampel air panasbumi serta analisis kimia air di laboratorium. Informasi geologi yang berkaitan dengan jenis litologi serta sebarannya diperoleh dengan menganalisis peta geologi gunungapi Lawu dan sekitarnya dari peneliti-peneliti terdahulu.

Pemeriksaan fisik serta pengukuran sifat fisika dan kimia air panasbumi dilakukan langsung di lapangan dengan mengukur suhu mata air panas, daya hantar listrik (DHL), jumlah padatan terlarut (*total dissolved solids* (TDS)) serta konduktivitas listrik (*electrical conductivity* (EC)). Adapun pemeriksaan fisik air panas meliputi pengamatan warna air, pH, suhu ruangan dan manifestasi serta endapan yang berada disekitar manifestasi serta pengukuran debit air. Sampel air panas kami ambil dengan mengikuti prosedur standar pengambilan sampel oleh Nicholson [10] dan Direktorat Panas Bumi, Ditjen EBTKE, [11]. Larutan pengawet HNO₃ ditambahkan ke dalam botol penyimpanan sampel air panas. Penambahan larutan pengawet tersebut bertujuan untuk menjaga keberadaan unsur-unsur kimia yang terkandung di dalam fluida panasbumi tersebut agar tetap berada di dalam sampel air.

Analisis geokimia air panasbumi yang kami lakukan di laboratorium meliputi analisis kandungan ion yang terkandung di dalam fluida panasbumi, meliputi ion-ion yang bermuatan positif (kation) dan ion-ion yang bermuatan negatif (anion). Kandungan ion yang bermuatan positif meliputi unsur Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, dan Na⁺, sedangkan konsentrasi ion yang bermuatan negatif berupa unsur HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ dan F⁻. Hasil analisis konsentrasi anion utama di dalam kandungan sampel air tersebut kemudian kami plot ke dalam diagram segitiga Cl⁻: SO₄²⁻: HCO₃⁻ untuk menentukan tipe fluida panas bumi.

Selain menggunakan peta struktur geologi dari peneliti terdahulu, kami juga melakukan analisis kelurusan dengan metode *Fault and Fracture Density* (FFD). Peta kerapatan kekar dan sesar (FFD) diperoleh dari hasil ekstraksi deteksi otomatis kelurusan morfologi, baik berupa morfologi sungai, lembah, dan bukit [12] [13], menggunakan data model ketinggian digital (DEM) yang telah diterbitkan oleh DEMNAS-Badan Informasi Geospasial, Indonesia. Kelurusan yang diamati bisa mencerminkan berbagai macam hal seperti struktur geologi, perbedaan litologi maupun antropogeik. Dalam penelitian tentang sistem panas bumi, kelurusan-kelurusan yang berkaitan dengan struktur geologi menjadi penting karena zona struktur biasanya berasosiasi dengan zona permeabilitas tinggi. Peta kerapatan kelurusan dapat dihitung secara otomatis dengan perhitungan komputer [14]. Hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan peta geologi daerah penelitian untuk mengetahui asosiasi kelurusan dengan adanya struktur geologi.

Setelah semua data diperoleh, analisa komprehensif dari data sebaran litologi, peta struktur geologi, sebaran manifestasi, data bawah permukaan, dan geokimia air panas kami gunakan untuk menyusun konsep sistem panas bumi daerah penelitian.

3. Hasil dan Analisis

Daerah penelitian berada pada sisi bagian barat-baratdaya kaki Gunungapi Lawu, Kecamatan Tawangmangu, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah (Gambar 1). Manifestasi panasbumi yang dijumpai di kawasan tersebut berupa mata air panas yang diinterpretasikan merupakan bagian dari zona outflow dari sistem panas bumi Gunungapi Lawu [7]. Sampel kimia air yang kami analisis pada studi ini kami ambil dari mata airpanas Pablengan (MP), Cumpleng (MC), Jenawi (MJ), Ngunut (MN) dan Bayanan (MB). Lokasi pengambilan sampel air panas dapat dilihat pada Gambar 1.

3.1. Kondisi Geologi Gunungapi Daerah Penelitian

Berdasarkan peta geologi gunungapi rinci oleh Abdurachman dkk [2], manifestasi air panas yang muncul di sisi lereng barat gunung Lawu berada pada satuan Aliran Lava Pra Lawu 2 (PLI2) dan Formasi Notopuro (NF). Satuan Aliran Lava Pra Lawu 2 tersusun oleh endapan primer Gunungapi Pra Lawu yang

berumur Kuartar Awal. Satuan ini adalah satuan tertua yang dijumpai di daerah penelitian. Beberapa manifestasi air panas yang muncul di satuan ini berupa mata air panas Jenawi, Pablengan dan Cumpuleng. Mata air panas Bayanan berada pada satuan batuan Formasi Notopuro sedangkan mata air panas Ngunut berada pada batas litologi antara Satuan Aliran Pra Lawu 2 dan Formasi Notopuro. Formasi Notopuro tersusun atas perselingan tuf dan batupasir tufaan, breksi lahar dan konglomerat vulkanik [2]. De Genevraye & Samuel [15] dan Pringgoprawiro [16] menyatakan bahwa Formasi Notopuro berumur Pleistosen awal, tersusun atas endapan lahar dari daratan, diendapkan di darat. Formasi ini menumpang secara selaras diatas Formasi Kabuh dengan ketebalan lebih dari 240 meter. Secara stratigrafi Formasi Notopuro berumur lebih muda dibandingkan dengan Satuan Aliran Lava PraLawu 2 (Gambar 1).



Gambar 2. Manifestasi panasbumi di kawasan Gunung Lawu, a. Mata air panas Bayanan di desa Jambeyan, b. Mata air panas Jenawi di desa Balong, c. Mata air panas Ngunut di desa Jetis, d. Mata air panas Pablengan di desa Pablengan, e. Mata air panas Cumpuleng di desa Plumbon dan e. Endapan travertine yang terdapat di sekitar mata air panas Jenawi [17].

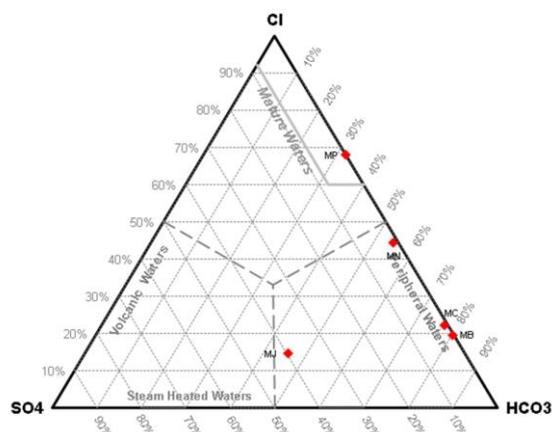
Struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian didominasi oleh keberadaan sesar-sesar turun yang berarah relatif baratlaut-tenggara dengan intensitas sesar yang orientasinya serupa banyak di jumpai di sisi bagian baratlaut/utara daerah penelitian. Sesar turun lainnya yang intensitasnya besar dengan orientasi relatif berarah barat-timur dijumpai berada di sisi bagian selatan daerah penelitian. Adapun sesar-sesar turun minor lainnya dapat dijumpai di zona puncak Gunungapi Lawu dengan orientasi relatif utara-selatan. Hasil analisis peta geologi gunungapi Lawu menunjukkan bahwa lokasi munculnya manifestasi mata air panas relatif berdekatan dengan jalur-jalur sesar turun, terutama manifestasi yang berada di sisi bagian barat laut daerah penelitian. Beberapa lokasi mata airpanas yang berjarak relatif dekat dengan jalur bidang sesar yakni mata airpanas 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 airpanas Cumpuleng berjarak sekitar $\pm 2, 5$ -kilometer dan mata airpanas Pablengan berjarak lebih jauh lagi sekitar ± 5 -kilometer dari jalur bidang sesar. Secara umum munculnya mata airpanas di sisi lereng kaki bagian barat Gunungapi Lawu berada di bagian zona yang turun (*downthrown side*) dari sesar-sesar turun yang berkembang di daerah penelitian.

3.2. Manifestasi Panasbumi

Hasil pemeriksaan fisik air di lapangan menunjukkan karakteristik airpanas Pablengan berwarna jernih dengan temperatur $\pm 35^{\circ}\text{C}$, memiliki pH netral (pH 7) dengan sedikit aroma berbau sulfur. Mata air panas Cumpleng terletak sekitar 500-meter ke arah tenggara dari mata air panas Pablengan. Mata air panas ini memiliki ciri khas berwarna kuning pekat dengan aroma sulfur yang menyengat, terdapat endapan oksida besi di sekitar mata air panas. Pengukuran pH menunjukkan air netral (pH 7) dengan temperatur berkisar $\pm 32^{\circ}\text{C}$. Pada mata air panas Ngunut, air berwarna putih kekuningan, tidak berbau, pH sedikit basa (pH 8) dan temperatur berkisar $\pm 38^{\circ}\text{C}$. Di bagian timur laut dari mata airpanas Ngunut dijumpai mata air panas Bayanan dengan sifat fisik air berwarna kuning dengan sedikit bau aroma sulfur, pH air mendekati netral (pH 6) dan temperatur $\pm 37^{\circ}\text{C}$. Di bagian tenggara dari mata airpanas Ngunut dijumpai mata airpanas Jenawi karakteristik airpanas berwarna putih kehijauan dengan sedikit berbau aroma sulfur, derajat keasaman netral (pH 7) dan temperatur $\pm 35^{\circ}\text{C}$ (Tabel 1). Di beberapa mata air panas dijumpai asosiasi endapan limonit dan travertin. Pada mata air panas Ngunut, Pablengan, Bayanan dan Cumpleng dijumpai endapan limonit, sementara pada mata air panas Jenawi dan Bayanan dijumpai endapan travertine (Tabel 1).

Tabel 1. Karakteristik fisik sampel air panasbumi di lapangan

Parameter Uji Fluida	Lokasi Pengambilan Sampel				
	Ngunut	Pablengan	Bayanan	Cumpleng	Jenawi
Warna	putih kekuningan	putih bening (jernih)	kuning	kuning pekat	putih kehijauan
Bau	tidak berbau	aroma sulfur kurang kuat	aroma sulfur tidak terlalu kuat	berbau sulfur dan besi berkarat	aroma sulfur kurang kuat
pH	8	7	6	7	7
Suhu air ($^{\circ}\text{C}$)	38	35	37	32	31
Suhu udara ($^{\circ}\text{C}$)	29,8	28	25	30,1	29,2
Kelembaban (%)	59	62	57	49	48
TDS (ppm)	963	4731	87	976	1897
DHL	1974	9470	1810	1930	3740
Manifestasi	endapan limonit	endapan limonit	endapan travertin dan limonit	endapan limonit	endapan travertin



Gambar 3. Hasil analisis anion utama untuk sampel air panas pada diagram segitiga $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{HCO}_3^-$ yang di oleh Giggenbach, 1998 (MJ: Mata air panas Jenawi, MP: Mata air panas Pablengan, MC: Mata air panas Cumpleng, MB: Mata air panas Bayanan dan MN: Mata air panas Ngunut)

3.3. Analisis Geokimia Air Panasbumi

Nilai konsentrasi anion dan kation dari hasil pengujian laboratorium atas sampel air panas yang diambil bisa dilihat pada Tabel 2. Hasil pengujian menunjukkan pola dominasi anion utama yang terkandung didalam fluida dapat digunakan untuk menentukan tipe fluida panasbumi yang memberikan petunjuk asal usul fluida, proses geologi yang terjadi dibawah permukaan serta untuk menentukan tipe air yang cocok digunakan untuk perhitungan geotermometer (penentuan suhu air reservoir). Tipe air panasbumi dapat diperkirakan dengan cara memplot prosentase konsentrasi anion utama pada diagram segitiga $\text{Cl}^- : \text{SO}_4^{2-} : \text{HCO}_3^-$. Berdasarkan hasil pengeplotan diperoleh dua tipe air panasbumi berupa tipe air klorida (*chloride water*) di sumber mata air panas di daerah Pablengan dan tipe air bikarbonat

(*bicarbonate water*) yang berada di sumber mata air panas daerah Bayanan, Ngunut, Cumpleng dan Jenawi.

Tabel 2. Hasil analisis geokimia panasbumi daerah Gunung Lawu

Kode sampel/Lokasi	Ngunut	Pablengan	Bayanan	Cumpleng	Jenawi
pH	6,8	6,8	7,1	6,7	6,9
Ca ²⁺ (mg/L)	68,34	218,90	103,48	75,12	175,12
Mg ²⁺ (mg/L)	97,69	31,44	77,37	48,36	53,20
Na ⁺ (mg/L)	39	5,932	345	453	962
K ⁺ (mg/L)	25	76	27	13	23
F ⁻ (mg/L)	0,0308	0,1856	0,0308	0,0308	0,2883
Cl ⁻ (mg/L)	184,9	4814,1	287,9	280,4	297,8
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	5	13	5	9	800
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	1006,6	2257,0	1189,5	976,0	921,1
Cl ⁻ (%)	44	68	19	22	14
SO ₄ ²⁻ (%)	1	0	1	1	40
HCO ₃ ⁻ (%)	54	32	80	77	46
<i>Ion Balance</i>	7	74	24	7	30

Hasil pengeplotan ketiga unsur anion utama ini dapat menunjukkan tipe air yang kemudian bisa digunakan untuk memperkirakan suhu, sumber air panas yang berinteraksi dengan air panas yang diuji. Mata air panas di Pablengan menunjukkan tipe air klorida (*chloride water*) sedangkan mata air panas Bayanan, Ngunut, Cumpleng dan Jenawi menunjukkan tipe air bikarbonat (*bicarbonate water*) (Gambar 3). Pada mata air panas Ngunut dan Cumpleng, prosentase kandungan bikarbonatnya cukup tinggi, yaitu 54 % dan 77% dengan perhitungan perbandingan antara anion dan kationnya adalah sebesar 7%. Adapun hasil perhitungan kesetimbangan ion (*ion balance calculation*) dari sampel-sampel yang kami uji di Pablengan, Bayanan dan Jenawi menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara anion dan kation yaitu sebesar 74%, 24% dan 30% (melebihi batas konvensi internasional sebesar 10%) (Tabel 2). Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran laboratorium pada sampel-sampe ini memiliki keakuratan yang rendah. Hanya hasil perhitungan pada sampel air panas Ngunut dan Cumpleng yang memiliki prosentase kesetimbangan ion di bawah 10%, sehingga hanya hasil dari kedua lokasi ini yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Tingginya prosentase angka kesetimbangan ion ini dapat diakibatkan oleh beberapa faktor, antara lain kesalahan dalam prosedur pengambilan dan pengujian sampel yang tidak sesuai prosedur, pemakaian botol sampling yang tidak sesuai standar sehingga terjadi kontaminasi, dan keterbatasan fasilitas laboratorium sehingga tidak semua unsur anion dan kation. Dalam penelitian ini, kami mengikuti prosedur pengambilan dan penyimpanan sampel kimia air yang tercantum didalam buku panduan geokimia air yang dikeluarkan oleh Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi, Yogyakarta.

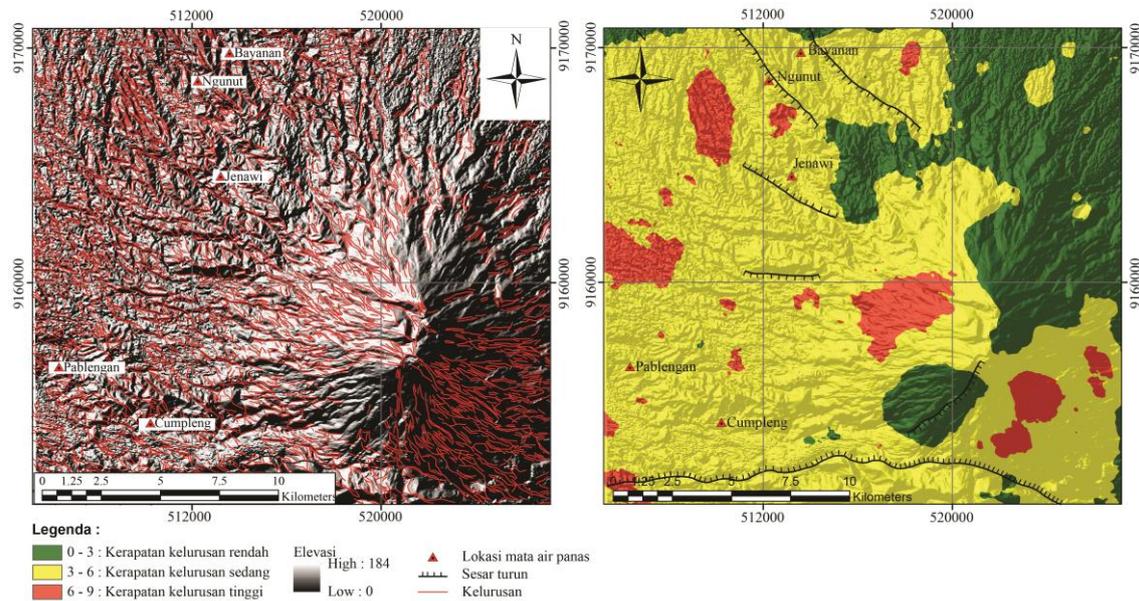
3.4. Peta Kerapatan Kelurusan

Hasil analisa kelurusan yang kami lakukan menunjukkan adanya tiga zona nilai kerapatan kelurusan (Gambar 4b), yaitu kerapatan rendah (area berwarna hijau), peta kerapatan sedang (area berwarna kuning) dan tinggi (area berwarna merah). Hasil kami menunjukkan bahwa kehadiran manifestasi panasbumi di daerah ini tidak berasosiasi dengan nilai kerapatan kelurusan yang tinggi tetapi berada pada zona dengan nilai kerapatan kelurusan sedang (Gambar 4b). Hal yang sama juga teramati atas kehadiran sesar-sesar normal di daerah penelitian dimana jalur sesar-sesar tersebut berada di area nilai kerapatan kelurusan yang sedang.

3.5. Diskusi

Keberadaan mata airpanas di Desa Jenawi, Ngunut, Bayanan, Cumpleng dan Pablengan tidak tepat berada di sepanjang jalur sesar-sesar utama yang berarah timurlaut-tenggara dan barat-timur akan tetapi berada pada blok turun dari sesar normal tersebut (*downthrown side*), ~5-7 km dari bidang sesar utama. Munculnya mata air panas pada jarak yang cukup jauh dari jalur sesar utama mengindikasikan bahwa bidang sesar utama tersebut bersifat impermeable. Hadirnya mata airpanas di kawasan tersebut diinterpretasikan berasosiasi dengan rekahan atau kekar yang terbentuk pada batuan penyusun di zona hanging wall sebagai akibat dari pergerakan sesar yang relatif turun. Zona rekahan ini merupakan zona

lemah (zona permeabel) yang memiliki kemampuan untuk meloloskan fluida panasbumi yang terepresentasi di permukaan oleh keberadaan mata air panas.



Gambar 4. a. Peta kelurusan, b. Peta kerapatan kelurusan daerah Gunung Lawu, *background* berupa peta *hillslope*

Hasil pengeplotan diagram segitiga $Cl^- : SO_4^{2-} : HCO_3^-$ memberikan informasi bahwa mata air panas Ngunut (MN) dan Cumpleng (MC) dikategorikan sebagai air peripheral. Tipe air panas ini umumnya terbentuk di dekat permukaan. Tipe air ini terbentuk akibat adanya pencampuran antara air panas reservoir yang bergerak secara horisontal dengan air permukaan (air meteorik). Tingginya konsentrasi karbonat pada kedua mata air panas tersebut mengindikasikan bahwa air panas reservoir tersebut telah menempuh perjalanan relatif jauh dari sumber panasnya sehingga memiliki waktu yang cukup lama untuk berinteraksi baik dengan batuan samping maupun dengan air permukaan (air meteorik). Lamanya interaksi antara air panasbumi dengan batuan samping atau air permukaan tersebut diindikasikan oleh kehadiran endapan limonit (kandungan unsur Fe), endapan travertine di sekitar manifestasi serta besarnya konsentrasi anion bikarbonat dibandingkan dengan anion utama lainnya pada hasil uji sampel air. Terdapatnya endapan limonit di sekitar manifestasi mengindikasikan bahwa air panasbumi berinteraksi dengan batuan dekat permukaan, yaitu satuan aliran lava Pra Lawu (PL.I2). Meskipun temperatur air permukaan pada mata air panas yang diamati cukup tinggi, akan tetapi tidak bisa digunakan untuk analisis geotermometer untuk menentukan temperature reservoir karena belum tentu berasal langsung dari reservoir. Sementara itu, untuk sampel kimia air panasbumi daerah Pablengan, Bayanan dan Jenawi tidak dilakukan analisis karena perhitungan kesetimbangan ion yang tinggi, tetapi data yang kami ambil tetap kami sajikan sebagai tambahan informasi untuk keperluan penelitian ini.

Peta kerapatan kelurusan menunjukkan bahwa daerah dengan kerapatan kelurusan yang tinggi berada pada daerah yang memiliki relief topografi yang kasar, hal ini mengindikasikan bahwa nilai kerapatan kelurusan tinggi lebih banyak dikontrol oleh proses-proses dan tidak secara langsung berasosiasi dengan struktur geologi (patahan atau kekar). Hal ini dikonfirmasi oleh peta geologi gunung api rinci [2] yang menunjukkan bahwa sesar-sesar turun di peta geologi berada pada zona kerapatan sedang. Kami menginterpretasikan bahwa faktor yang mempengaruhi nilai kerapatan kelurusan di kawasan gunungapi tersebut adalah proses permukaan. Proses-proses permukaan ini bisa dikontrol oleh jenis litologi yang mempengaruhi resistensi batuan terhadap tingkat pelapukan dan erosi. Resistensi batuan juga dapat dipengaruhi oleh umur litologi, semakin tua batuan maka tingkat pelapukan semakin tinggi sehingga mudah terosi sehingga akan menghasilkan relief topografi sedang hingga kasar, yang akan menunjukkan nilai kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi (contohnya satuan aliran lahar Pra Lawu 1 (PL.I1) dan Pra Lawu 2 (PL.I2), lihat Gambar 1). Komposisi batuan juga dapat mempengaruhi nilai kerapatan kelurusan, aliran lava akan membentuk morfologi yang terjal dan curam dibandingkan dengan aliran lahar sehingga aliran lava akan menghasilkan tekstur morfologi yang kasar dengan nilai

kerapatan kelurusan yang sedang hingga tinggi dibandingkan dengan aliran lahar (contoh aliran lava LI.8, LI.9, LI.11, LI.12, LI.13 dan LI.14, lihat peta geologi dan peta kelurusan pada Gambar 1). Aspek lainnya yang mempengaruhi nilai kerapatan kelurusan adalah adanya variasi jenis litologi, misalnya pada satuan batuan yang tersusun atas variasi batuan tuf dengan batupasir tufaan, breksi lahar dan konglomerat vulkanik (Formasi Notopuro) akan menghasilkan tekstur morfologi yang sedang hingga kasar dengan nilai kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh tingkat pelapukan dan erosi yang berbeda-beda pada batuan penyusun satuan tersebut sehingga mencerminkan relief yang beragam dan kasar.

4. Kesimpulan

Hasil analisis geokimia air menunjukkan bahwa tipe air panasbumi di daerah Ngunut dan Cempleng adalah tipe air bikarbonat. Tipe air ini terbentuk di kedalaman dekat permukaan, yang terbentuk akibat adanya pencampuran air reservoir dan air permukaan yang terpanaskan ketika panas bergerak secara horisontal dan keluar sebagai manifestasi air panas. Hasil analisis peta geologi mengindikasikan bahwa pemunculan manifestasi mata air panas di kawasan barat-baratdaya Gunungapi Lawu berada di blok turun dari suatu sesar normal (*downthrown side*), dan berjarak cukup jauh dari bidang sesar utama. Hal ini mengindikasikan bahwa bidang sesar tersebut bersifat *impermeable*. Kami menginterpretasikan bahwa pemunculan mata air panas di daerah ini lebih dikontrol oleh adanya rekahan dan kekar minor yang mengakibatkan fluida bisa muncul ke permukaan. Penelitian kami juga menunjukkan bahwa analisa kerapatan kelurusan tidak bisa digunakan sebagai acuan untuk penentuan zona struktur pada kawasan gunung api. Hasil analisis peta kerapatan kelurusan menunjukkan bahwa keberadaan jalur sesar-sesar normal utama yang dipetakan tidak berasosiasi nilai kerapatan kelurusan tinggi, tetapi berada pada nilai kerapatan kelurusan yang sedang. Hal ini menunjukkan bahwa nilai kerapatan lineament lebih dikontrol oleh proses-proses permukaan dan tidak secara langsung berasosiasi dengan struktur geologi.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Gayatri Indah Marliyani atas diskusi tentang analisis struktur geologi, Badan Informasi Geospasial Indonesia, DEMNAS atas ketersediaan data model ketinggian digital (DEM) di daerah penelitian serta semua pihak yang telah membantu penelitian ini, terutama Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat dan Inovasi Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (LPPMI ITNY) atas bantuan pendanaan penelitian.

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, Tjiong 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] Pambudi, Dwi Yuda Wahyu Setya, 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, R., Maryudi, M., & Purba, V. (2018). Integrated Research for Geothermal Prospect Zone of Lawu Mountain Based On Geothermal Manifestation, Rock Alteration, Geochemical Analysis Of Fluid, Fault Fracture Density And Magnetotelluric Data. In ASEAN/Asian Academic Society International Conference Proceeding Series (pp. 595-604).
- [7] Satrio, A., & Koesuma, S. Identifikasi Panas Bumi di Daerah Ngijodan Pablengan Karanganyar Menggunakan Metode AudioMagnetotelurik. Indonesian Journal of Applied Physics, 2012, 2(2), 1-7.
- [8] Wilopo, W., Wilopo, W., Dhilaga, K., & Dhilaga, K. Genesa Mata Air Di Daerah Pablengan–Cempleng, Kecamatan Matesih–Tawangmangu, Kabupaten Karanganyar, Propinsi Jawa Tengah.

- In Prosiding Seminar Nasional Kebumian Ke-7 Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, 30–31 Oktober 2014. Jurusan Teknik Geologi.
- [9] Wowa, F., & Wiloso, D. A. 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 Kebumian Ke-10 Peran Penelitian Ilmu Kebumian Dalam Pembangunan Infrastruktur Di Indonesia 13–14 September 2017; Grha Sabha Pramana.
- [10] Nicholson, Keith. Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993, 151-154.
- [11] Direktorat Panas Bumi, Ditjen EBTKE, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, & Badan Geologi. 2017, Potensi Panasbumi Indonesia, Jilid 1, Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia
- [12] Abdullah, Anwar; NASSR, Shawki; GHALEEB, Abdoh. Landsat ETM-7 for lineament mapping using automatic extraction technique in the SW part of Taiz Area, Yemen. Glob. J. Hum.-Soc. Sci. Res, 2013, 13: 35-37.
- [13] Radaideh, Omar MA, dkk. Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS: An example in SW Jordan. *Geomorphology*, 2016, 275: 58-79.
- [14] Nugraha, Husin Setia, dkk. 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.
- [15] De Genevraye, Patrick, dan Samuel, Luki. "Geology of the Kendeng Zone (Central & East Java)." 1972: 17-30.
- [16] Pringgoprawiro, H. Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur: Suatu Pendekatan Baru. 1983. PhD Thesis. Thesis Doktor, ITB, Bandung.
- [17] Widi, H.N.A., Kajian Geokimia Fluida Panasbumi di Lereng Gunung Lawu Bagian Basat dan Sekitarnya, Kabupaten Karanganyar-Sragen, Jawa Tengah, Seminar Geologi, Prodi-Geologi ITNY, 2018.