

Geomedia

Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian



Geomedia Vol. 19 No. 2 Tahun 2021 | 136 – 148

<https://journal.uny.ac.id/index.php/geomedia/index>

Hidrogeomorfologi mata air stratovulkano di area Celah Selo Jawa Tengah

Muhammad Asrori Indra Wardoyo ^{1*}, Nurul Khotimah ²

Jurusan Pendidikan Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Yogyakarta

¹ muhammadasrori.2017@student.uny.ac.id*; ²nurulkhotimah@uny.ac.id

*korespondensi penulis

Informasi artikel	A B S T R A K
<i>Sejarah artikel</i> Diterima : 8 Oktober 2021 Revisi : 23 November 2021 Dipublikasikan : 30 November 2021	Area Celah Selo secara geomorfologis berada diantara Vulkan Merbabu dan Merapi yang memiliki perbedaan karakteristik vulkanisme. Perbedaan ini merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi variasi pola persebaran dan karakteristik mata air. Penelitian bertujuan untuk menganalisis pola persebaran dan karakteristik mata air di area Celah Selo. Penelitian ini menggunakan metode survei-deskriptif dengan model kuantitatif. Sampel mata air ditentukan dengan sistematis sampling. Data dianalisis secara deskriptif yang mempertimbangkan aspek spasial dengan analisis <i>average nearest neighbour</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola sebaran mata air di sisi selatan Vulkan Merbabu menunjukkan jenis seragam atau <i>dispersed</i> , sedangkan sisi utara Vulkan Merapi hanya dijumpai satu mata air. Karakteristik mata air secara kuantitas ditunjukkan oleh variasi debit tinggi dan rendah. Debit tinggi mencapai 10 l/dt sedangkan debit rendah hanya 0,008 l/dt. Kualitas air menunjukkan hasil yang baik dimasing masing lokasi mata air, namun terdapat parameter DHL dan TDS di satu mataair yang menunjukkan hasil sangat tinggi. Secara umum, studi ini memberikan wawasan tentang pengaruh penting jenis batuan terhadap karakteristik mata air di kaki vulkan.
Kata kunci: Hidrogeomorfologi Mata Air Startovulkano Celah Selo	
Keywords: Hydrogeomorphology Springs Stratovolcano The Selo Gap	A B S T R A C T The Selo Gap area is geomorphologically located between Merbabu and Merapi volcanoes which have different characteristics of volcanism. This difference is one of the factors that affect variations in the distribution pattern and characteristics of the springs. This study aims to analyze the distribution pattern and characteristics of the springs in the Selo-Gap area. This study uses a survey-descriptive research method with a quantitative model. The sample of springs was determined by a systematic sampling. The data is then analyzed descriptively which considers the spatial aspect with the analysis of the average nearest neighbor. The results of this study indicate that the distribution pattern of springs on the southern flank of Merbabu Volcano is dispersed type, while the northern side of Merapi Volcano only has one spring. The characteristics of the springs in quantity are shown by variations in high and low discharge. The high discharge reaches 10 l/s while the low discharge is only 0.008 l/s. Water quality shows good results in each location of the springs, but there are DHL and TDS parameters in one spring which show very high results. In general, this study provides insight of the important influence of rock type on the characteristics of springs at the foot of the volcano.

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan tingkat keaktifan geologis yang tinggi, karena terletak pada pertemuan tiga lempeng besar dunia. Lempeng tersebut adalah Asia Tenggara, Hindia-Australia, dan Pasifik. Kerangka tiga lempeng mengasumsikan bagian yang berfungsi dalam pengembangan morfostruktural sebagai busur kepulauan, dikelilingi oleh palung dan basin laut (Verstappen, 2013). Komponen-komponen ini membuat wilayah Indonesia sangat dipengaruhi oleh perkembangan lempeng yang sangat dinamis, yang ditandai oleh berbagai aktivitas gempa bumi dan vulkanisme. Dalam kaitannya dengan vulkanisme, Indonesia disebut sebagai negara yang terletak di Cincin Api Pasifik (*ring of fire*), dengan ciri sebagai negara kepulauan yang memiliki banyak vulkan berapi, baik yang aktif maupun yang tidak aktif. Vulkan Merapi merupakan salah satu vulkan aktif di Indonesia, sedangkan Vulkan Merbabu merupakan vulkan yang telah tidak aktif dalam waktu lama sehingga sudah menunjukkan gejala terdenudasi. Kedua vulkan ini terletak saling berdekatan yang ditunjukkan oleh morfologi pelana kuda, morfologinya terbingkai dalam potongan tubuh kedua vulkan dan jarak antara kedua puncak hanya 9,6 kilometer (Mulyaningsih dkk, 2015).

Pada pertemuan antara kaki Vulkan Merapi dan Vulkan Merbabu terdapat wilayah Celah Selo. Wilayah Celah Selo secara administratif merupakan bagian dari Kecamatan Selo yang terletak di Kabupaten Boyolali, Provinsi Jawa Tengah. Seluruh wilayah ini berada pada bentuklahan vulkanik, tepatnya di tengah dua vulkan, yaitu Vulkan Merbabu di sisi utara dan Vulkan Merapi di sisi selatan. Meskipun terletak berdekatan, kedua vulkan ini memiliki tingkat status yang berbeda. Vulkan Merapi merupakan vulkan tipe A sedangkan Vulkan Merbabu merupakan tipe B (Van Bemmelen, 1949).

Sebagai wilayah yang terletak pada bentuklahan vulkanik, Celah Selo memiliki potensi sumberdaya air yang tinggi. Sebagaimana dijelaskan oleh Santosa (2006), bentuklahan vulkanik merupakan wilayah yang memiliki potensi aset sumber air tinggi yang dipengaruhi oleh perubahan morfologi kemiringan lereng,

siklus proses geomorfologi, jenis batuan, dan struktur geologis penyusunnya. Ashari (2014), juga menjeaskan bahwa kondisi bentuklahan vulkanik berkombinasi dengan pengaruh iklim tropis di Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi sehingga menyebabkan banyaknya mata air. Unsur-unsur morfologi dalam kerucut vulkan api juga mendukung perkembangan hujan orografis sehingga wilayah vulkan api tersebut memiliki curah hujan yang banyak. Santosa (2006), memperinci bahwa sifat-sifat bahan penyusun yang terbentuk dari material piroklastik meningkatkan permeabilitas sehingga tingkat penyerapan air juga akan lebih tinggi. Tingginya aset sumber daya air di wilayah vulkanik juga dapat digambarkan dengan berkembangnya sabuk mata air yang dipengaruhi keberadaan tekuk lereng pada satuan bentuklahan lereng vulkan dan kaki vulkan.

Vulkan Merapi merupakan vulkan yang aktif, bahkan banyak disebut sebagai salah satu vulkan paling aktif di dunia dan dikenal pula sebagai *never sleeps volcano*. Formasi batuan hasil aktivitas vulkanik di Vulkan Merapi masih tergolong muda, dimana potensi erupsi dan pengeluaran material baru di Vulkan Merapi umumnya sangat cepat. Hal ini membuat Vulkan Merapi memiliki tanah yang permeabel karena termasuk sebagai wilayah *major aquifer* (Aurita & Purwantara, 2017). Sementara itu Vulkan Merbabu merupakan vulkan yang saat ini tidak aktif dan sudah mulai terkikis akibat dampak iklim yang kuat. Pelapukan batuan hasil sedimentasi aktifitas erupsi masa lalu di Vulkan Merbabu berlangsung cepat sehingga mulai masuk dalam tahap terdenudasi (Nurhadi dkk, 2015). Perbedaan antara kedua jenis vulkan tersebut memungkinkan terjadi perbedaan pola persebaran dan karakteristik mata air.

Keberadaan mataair disisi lain juga mendorong tingginya minat untuk menjadikan wilayah tersebut sebagai tempat tinggal. Hal ini karena air merupakan sumberdaya yang penting dan dibutuhkan bagi kehidupan. Wilayah Celah Selo yang berada pada bentanglahan vulkanik dengan potensi sumberdaya air tinggi juga banyak ditempati oleh penduduk. Data Badan Pusat Statistik Kecamatan Selo (2020), menunjukkan

bahwa di Kecamatan Selo, terdapat 10 desa, tiga desa di antaranya berada di area Celah Selo, yaitu: Lencoh, Samiran, dan Selo. Populasi penduduk keseluruhan yang menempati celah selo pada tahun 2020 adalah sebanyak 10.206 jiwa. Tentunya, jumlah penduduk yang besar memiliki tingkat kebutuhan air yang besar pula untuk memenuhi kebutuhan utama sehari-hari. Kebutuhan akan penyediaan sumber air juga akan semakin meningkat karena area Celah Selo merupakan wilayah yang sedang tumbuh dengan dibukanya beberapa destinasi wisata alam, maka dari itu pemberdayaan sumber mata air pada daerah tersebut sangat penting.

Disisi lain, wilayah Celah Selo di Kecamatan Selo, Kabupaten Boyolali juga merupakan wilayah rawan bencana. Bencana yang kerap melanda kawasan ini adalah erupsi vulkanik dan longsor (Nurhadi dkk, 2015). Potensi erupsi vulkanik dihasilkan dari aktivitas Vulkan Merapi yang tinggi dengan periode erupsi ulang yang singkat. Sementara itu potensi bencana longsor disebabkan oleh paparan iklim yang melapukan dan mengikis bebatuan pada Vulkan Merbabu dan Merapi. Mengingat potensi kejadian bencana alam dari erupsi vulkan berapi dan longsor dengan jumlah penduduk yang padat di Celah Selo akan meningkatkan resiko kerugian baik dari sudut pandang segi sosial-ekonomi serta dapat menimbulkan korban jiwa. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan kebencanaan sangat penting untuk diterapkan dalam upaya mengurangi risiko akibat bencana alam. Manajemen kebencanaan dapat diawali dengan mengidentifikasi dan menginformasikan data terkait mata air. Upaya ini antara lain pernah dilakukan oleh Ratih dkk (2019) melengkapi pentingnya informasi sumberdaya pendukung penanganan bencana, alih-alih terbatas pada infrastruktur sebagaimana dijelaskan oleh Setyawati dkk (2013).

Penelitian ini menggunakan kajian hidrogeomorfologi mata air yang secara khusus bertujuan untuk menganalisis pengaruh kondisi geomorfologis setiap karakteristik bentuklahan vulkanik di area Celah Selo terhadap pola distribusi dan karakteristik mata air. Perkembangan faktor geomorfologis dan pengaruhnya terhadap pemunculan mata air juga

merupakan informasi yang perlu diselidiki dalam studi ini. Selain itu, perbedaan karakteristik bentuklahan Vulkan Merapi dan Vulkan Merbabu dan berpengaruh terhadap potensi maupun dan karakteristiknya mata air juga penting untuk dianalisis.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode penelitian survei-deskriptif dengan model kuantitatif. Penelitian survei-deskriptif merupakan proses penelitian yang lebih mengarah pada pengungkapan suatu masalah atau keadaan sebagaimana adanya fakta-fakta yang ada, terkadang diberikan interpretasi dan analisa untuk mendapatkan informasi secara luas dan mendeskripsikan hasil temuan lapangan terkait mata air. Pendekatan yang diterapkan untuk penelitian ini adalah berebagai pendekatan geografi yaitu pendekatan keruangan serta menekankan tema geografi yaitu lokasi dan tempat dalam pembahasan.

Pengambilan data mata air dilakukan dengan teknik sistematik sampling. Survey satuan unit hidrogeomorfologi mata air mencakup seluruh wilayah tekuk lereng (*break of slope*), yang tersebut pada satuan bentuklahan lereng vulkan, kaki vulkan hingga dataran kaki vulkan. Secara administratif wilayah tersebut terletak di tiga desa yaitu Lencoh, Samiran, dan Selo. Pengumpulan data dilakukan dengan observasi, studi pustaka, dan dokumentasi. Kaitan antara indikator, teknik pengumpulan data, serta instrumen atau sumber data ditunjukkan oleh Tabel 1.

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan analisis SIG didukung dengan analisis deskriptif dengan memperhatikan aspek spasial, serta analisis pencocokan (*matching*). Teknik dalam analisis SIG yang digunakan untuk menunjukkan pola distribusi mata air di satuan bentuklahan vulkanik adalah *Average Nearest Neighbour Analysis*. Pola persebaran dalam sistem analisis ini meliputi pola seragam (*dispersed*), pola mengelompok (*clustered*), pola acak (*random*). Penggunaan metode ini dalam menganalisis pola persebaran mata air di wilayah Merapi dan Merbabu telah dilakukan oleh Aurita & Purwantara (2017); Ashari & Widodo (2019); Santosa (2006); dan Ratih dkk (2018). Penggunaan metode analisis ini di wilayah Vulkan Merapi juga pernah dilakukan oleh Ashari

dkk (2021) untuk mengetahui pola persebaran lembah sungai purba.

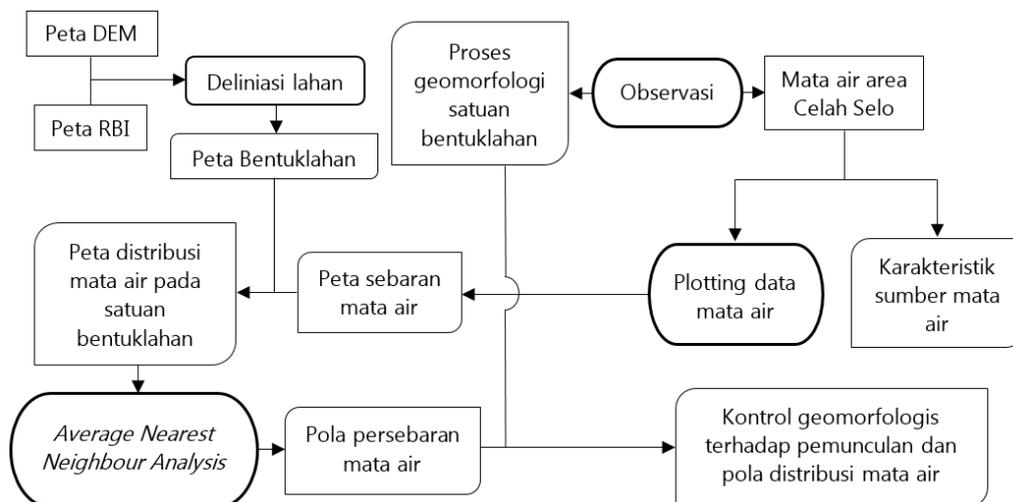
Analisis *Average Nearest Neighbour* dilakukan dengan menggunakan perangkat QGIS 3.0.0. Hasil analisis SIG dibahas secara deskriptif dengan menekankan aspek spasial. Hal ini bertujuan untuk memperhatikan pengaruh kondisi satuan geomorfologis terhadap pola persebaran mata air. Analisis deskriptif juga berguna untuk mempertajam informasi mengenai proses geomorfologi yang berlangsung dengan gejala pembentukan pola sebaran mata air dalam medan di area penelitian.

Analisis deskriptif digunakan dengan metode pencocokan (*matching*), yaitu hasil pengukuran

debit mata air yang dicocokkan dengan kriteria klasifikasi tipe dan debit mata air. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan data mengenai kuantitas mata air. Analisis selanjutnya untuk mendapatkan hasil kualitas air yaitu menggunakan analisis deskriptif menurut Davie (2008) dengan memakai uji korelasi. Analisis tersebut digunakan untuk mempertajam tingkat analisis setiap kualitas air secara deskriptif berdasarkan data hasil pengukuran in situ di lapangan. Skema penelitian mulai dari pengambilan data, pengolahan data sampai pada hasil dapat dilihat pada diagram alir penelitian Gambar 1.

Tabel 1. Teknik Pengumpulan Data dan Instrumen Pengumpulan Data

Indikator	Teknik Pengumpulan Data	Instrumen atau Sumber Data
Kondisi geomorfologis dan litologi pada satuan bentuk lahan	Observasi	Kamera, Yalon, Klinometer, dan Lembar observasi berdasarkan Van Zuidam (1979.)
	Studi Pustaka	Buku Verstappen (2013) dan Sutikno dkk (2007).
	Dokumentasi	Peta Geologi Lembar Magelang-Semarang serta Yogyakarta; Peta RBI skala 1: 25000 lembar Kaliurang dan Ngablak; Citra Google Earth; dan Peta DEM.
Lokasi mata air	Observasi	GPS, Kamera, dan Lembar observasi.
	Studi Pustaka	Data mata air dari desa dan buku Sutikno dkk (2007).
Debit mata air	Observasi	Instrumen pengukuran debit mata air dengan metode volumetrik dan botol 1 liter.
Kualitas air mata air	Observasi	Multiparameter meter, Lembar observasi, dan Kamera.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

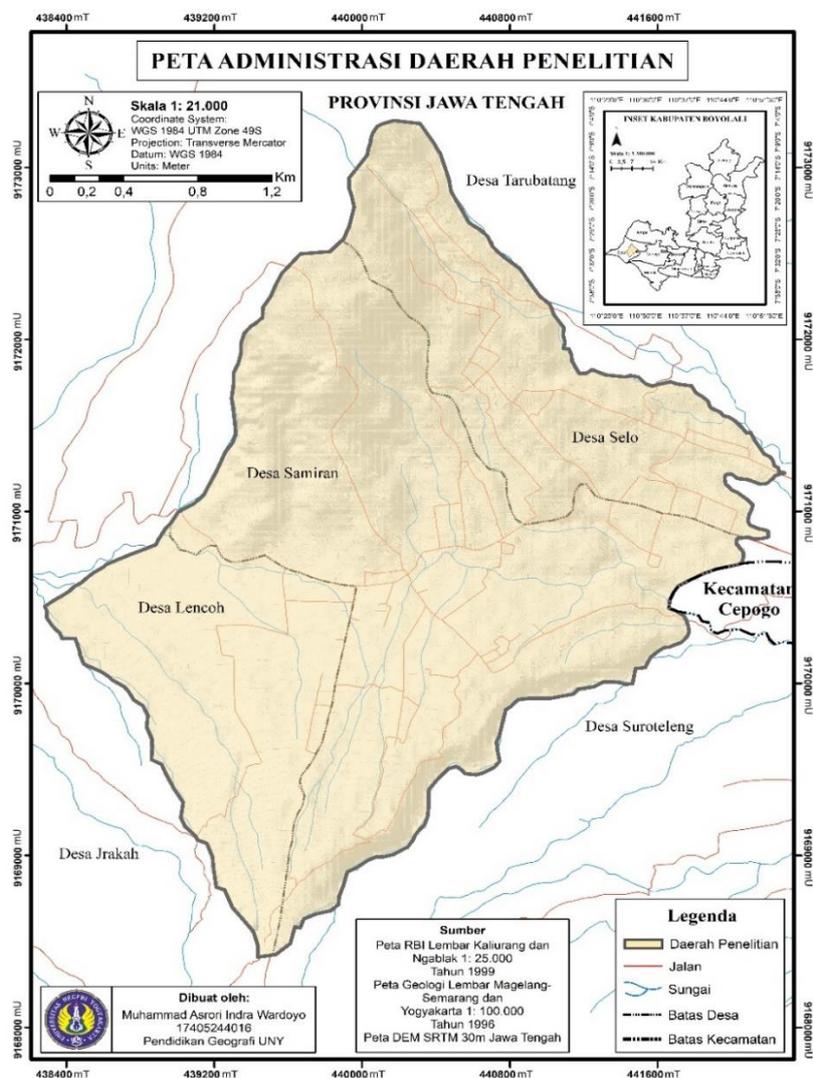
Hasil dan pembahasan

Daerah Penelitian

Penelitian ini dilakukan di area Celah Selo. Secara administratif daerah penelitian terletak di Kecamatan Selo, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah, namun hanya mencakup 3 dari 10 Desa di kecamatan ini yaitu Lencoh, Samiran, dan Selo. Lokasi penelitian ini terletak pada 9173279 mU - 9168416 mU dan 442286 mT - 438283 mT dengan konversi koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) UTM Zona 49S dengan ketinggian tempat antara 1440 sampai 2078 mdpl. Keseluruhan luas wilayah penelitian mencapai 887,83 ha. Batas administrasi dalam penelitian ini antara lain Desa Tarubatang di sebelah utara, Desa Tarubatang dan Kecamatan Cepogo di sebelah timur. Desa Suroteleng di sebelah selatan, dan Desa Jrah di sebelah barat. Wilayah ini secara fisik keseluruhnya berbatasan dengan satuan bentuklahan dua vulkan yaitu Vulkan Merbabu di sebeah utara dan

Vulkan Merapi di sebelah selatan. Sementara itu secara fisik batas timur dan batas barat wilayah penelitian ini mencakup lembah-lembah sungai ([Gambar 2](#)).

Penggunaan lahan pada daerah penelitian terdiri dari permukiman, kebun, tegalan, rumput, dan semak belukar. Penggunaan lahan terbesar pada area Celah Selo adalah lahan tegalan. Studi yang dilakukan oleh [Masruri & Ashari \(2015\)](#) serta [Syahidah dkk \(2016\)](#), menunjukkan bahwa tegalan merupakan bentuk penggunaan lahan yang penting di wilayah ini. Tegalan umumnya dimanfaatkan untuk penanaman tanaman budidaya yang berupa tanaman semusim terutama palawija dan sayuran. Data [BPS Kecamatan Selo \(2020\)](#), menunjukkan bahwa penduduk di wilayah ini juga melakukan pengembangan atau penanaman tanaman sayuran lainnya.



Gambar 2. Peta Administrasi Daerah Penelitian

Kecamatan Selo memiliki curah hujan tinggi dibandingkan kecamatan lain disekitarnya. Puncak hujan terjadi pada bulan November dan Desember. Dalam konteks hidrogeomorfologi, curah hujan yang tinggi ini merupakan faktor yang mempengaruhi laju fenomena geomorfik dan berperan penting dalam perkembangan mata air. Nurhadi dkk (2015), menjelaskan iklim di wilayah ini termasuk dalam tipe C, yaitu termasuk dalam jenis iklim agak basah hingga basah jika dilihat dalam jenis tipe iklim berdasarkan klasifikasi iklim Schmidt-Ferguson.

Secara geomorfologis daerah penelitian terdapat pada area celah antar Vulkan Merapi dan Vulkan Merbabu. Kedua vulkan tersebut memiliki karakteristik keaktifan yang berbeda. Satuan bentuklahan dalam penelitian ini kerucut vulkan meliputi lereng vulkan, kaki vulkan, dan dataran kaki vulkan. Satuan bentuk lahan tersebut memiliki potensi pemunculan mata air. Wilayah tersebut mempunyai karakter tingkat infiltrasi curah hujan yang tinggi dan dengan tempat yang bersesuaian dengan tempat terjadinya perubahan kemiringan lereng (*break of slope*). Selain wilayah pegunungan yang merupakan wilayah resapan air dan memiliki curah hujan tinggi, area tekuk lereng (*break of slope*) juga mempunyai karakter perpotongan lereng yang dapat memotong muka air tanah (Sutikno dkk, 2007).

Proses geomorfologi di wilayah ini bervariasi. Vulkan Merapi mempunyai sifat konstruktif yang kuat daripada faktor eksogen yang mempengaruhi bentuklahan. Sementara itu, Vulkan Merbabu sudah dalam keadaan tidak aktif sehingga faktor eksogen berpengaruh besar terhadap perkembangan bentuklahan. Keadaan geomorfologi yang bervariasi ini dapat mempengaruhi mataair bersama dengan faktor lainnya seperti hujan, permeabilitas, struktur batuan, *landuse*, dan geologi (Santosa, 2006).

Pada lereng Vulkan Merbabu terdapat litologi batuan Vulkan Merbabu yang berupa aliran andesit. Di wilayah Vulkan Merbabu juga terdapat batuan basal olivin dan andesit augit. Sementara itu pada lereng Vulkan Merapi terdapat litologi endapan Vulkan Merapi Tua yang terdiri dari breksi, aglomerat, leleran lava, batu andesit, dan basal olivin. Jenis batuan lainnya pada sisi Vulkan Merapi adalah Vulkan Merapi Muda dengan komposisi terdiri dari hamparan tuf, abu, breksi, aglomerat, dan leleran lava tak terpisahkan.

Pola Persebaran Mata Air pada Satuan Bentuklahan Area Celah Selo

Hasil studi ini memperoleh temuan 8 mata air pada seluruh area Celah Selo. Mata air tersebut meliputi Tuk Babon, Tuk Pakis, Tuk Tegalseruni, Tuk Genting, Tuk Kembang, Tuk Pasang, Tuk Panguripan, dan Tuk Sidodadi (Gambar 3). Mata air tersebut ditemukan pada satuan bentuk lahan kaki vulkan baik pada wilayah Lereng Vulkan Merapi maupun wilayah lereng Merbabu. Mata air tersebut terdapat pada tekuk lereng dan lembah sungai. Mata air yang berada pada tekuk lereng adalah Tuk Babon, Tuk Pakis, dan Tuk Tegalseruni, sedangkan mata air yang ditemukan pada lembah sungai adalah Tuk Genting, Tuk Kembang, Tuk Pasang, Tuk Panguripan, dan Tuk Sidodadi.

Jenis mata air yang ada pada daerah penelitian adalah jenis mata air depresi dan mata air kontak (Tabel 2). Tipe mata air depresi merupakan tipe yang paling banyak dijumpai. Tipe ini terbentuk karena pemotongan muka air tanah dalam proses degradasi lahan sebagai akibat dari pedalaman lembah. Tipe ini juga terbentuk karena pemotongan muka air tanah pada tekuk lereng. Pada area tekuk lereng, terjadi perubahan kemiringan yang signifikan karena perpindahan antar satuan bentuk lahan. Kondisi ini juga berpengaruh terhadap terpotongnya akuifer sehingga membentuk mataair. Pada satuan bentuklahan kaki vulkan juga terdapat lembah-lembah yang dalam. Pedalaman lembah ini juga menyebabkan pemotongan akuifer sehingga sangat potensial memunculkan mata air.

Pemunculan mataair juga tidak terlepas dari suplai air dari hujan orografis yang terjadi pada morfologi bagian atas yaitu kerucut dan lereng vulkan. Vulkan Merbabu dan Merapi sebagai stratovolkano banyak mengalami hujan orografis. Hujan tersebut kemudian meresap ke dalam lapisan batuan dan muncul kembali sebagai mataair pada kaki vulkan.

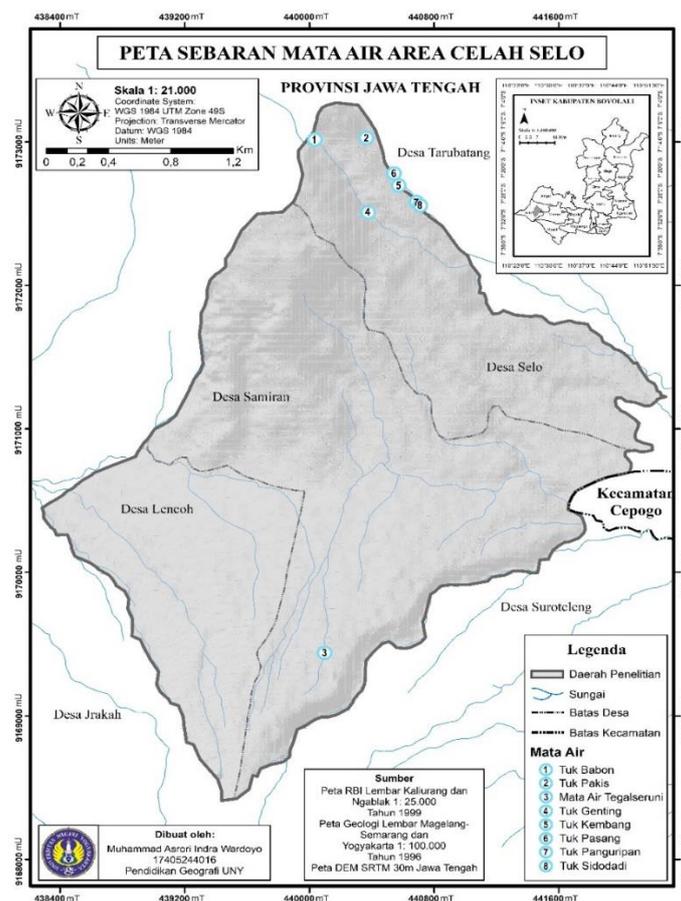
Mataair pada kaki stratovolkano umumnya membentuk pola persebaran yang unik sebagai sabuk mataair vulkanik, sebagaimana dijumpai oleh Santosa (2006), Ashari (2014), Ratih dkk (2018), serta Ashari dan Widodo (2019). Pola sabuk mataair juga dapat termodifikasi akibat pedalaman lembah sebagaimana ditemukan oleh Aurita dan Purwantara (2017). Studi ini juga mencoba menganalisis pola persebaran mataair di kaki stratovolkano yang berada di wilayah celah selo, yaitu kaki Vulkan Merbabu bagian selatan

dan Merapi bagian utara. Namun demikian, pada kaki Vulkan Merapi bagian utara ini hanya dijumpai satu mataair sehingga tidak dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola persebaran mata air.

Hasil analisis pola sebaran mataair di kaki Vulkan Merbabu bagian selatan memperoleh nilai *z-score* yang besar dan positif (+), dengan nilai 4,137440. Hasil ini menunjukkan persebaran mata air pada kaki Vulkan Merbabu bagian selatan berpola seragam atau *dispersed* (Gambar 4A). Hasil pola seragam ini terjadi karena faktor pemunculan mata air pada lembah sungai yang berpola radial. Dengan kata lain pola lembah sungai lebih berperan dalam mempengaruhi pola sebaran mataair daripada posisi tekuk lereng. Proses denudasi yang mulai terjadi pada kaki Vulkan Merbabu sehingga menyebabkan pendalaman lembah ternyata berpengaruh terhadap pola sebaran mataair di wilayah ini (Gambar 4B).

Pola persebaran mataair sebagai akibat dari pengaruh kondisi geomorfologi yang ditemukan di daerah penelitian memiliki persamaan dan perbedaan apabila dibandingkan dengan hasil

penelitian terdahulu. Pola persebaran mata air yang seragam (*dispersed*) di daerah penelitian ini menunjukkan eksistensi sebaran yang unik. Penelitian ini memperoleh temuan menarik yang berbeda dengan temuan penelitian sebelumnya. Hasil penelitian terdahulu sebagaimana dilakukan oleh Santosa (2006), Ashari (2014), Aurita & Purwantara (2017), Ratih dkk (2018), serta Ashari & Widodo (2019) menunjukkan bahwa pola persebaran mata air di Vulkan strato di Jawa biasanya berbentuk sabuk mata air (*spring belt*). Namun demikian, sebaran mata air di kaki Vulkan Merbabu bagian selatan yang ditemukan dalam penelitian ternyata tidak menyerupai pola sabuk mata air. Pemunculan mata air cenderung dikontrol oleh pola aliran lembah sungai yang radial, walaupun beberapa juga dikontrol oleh tekuk lereng. Hal ini tidak terlepas dari karakteristik geomorfologis Vulkan Merbabu saat ini yang sudah mengalami proses terdenudasi, pendalaman lembah pada lereng sisi selatan Vulkan Merbabu tergolong masif dan dalam. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas energi eksogen yang lebih tinggi daripada energi endogen mempengaruhi pola sebaran mata air.

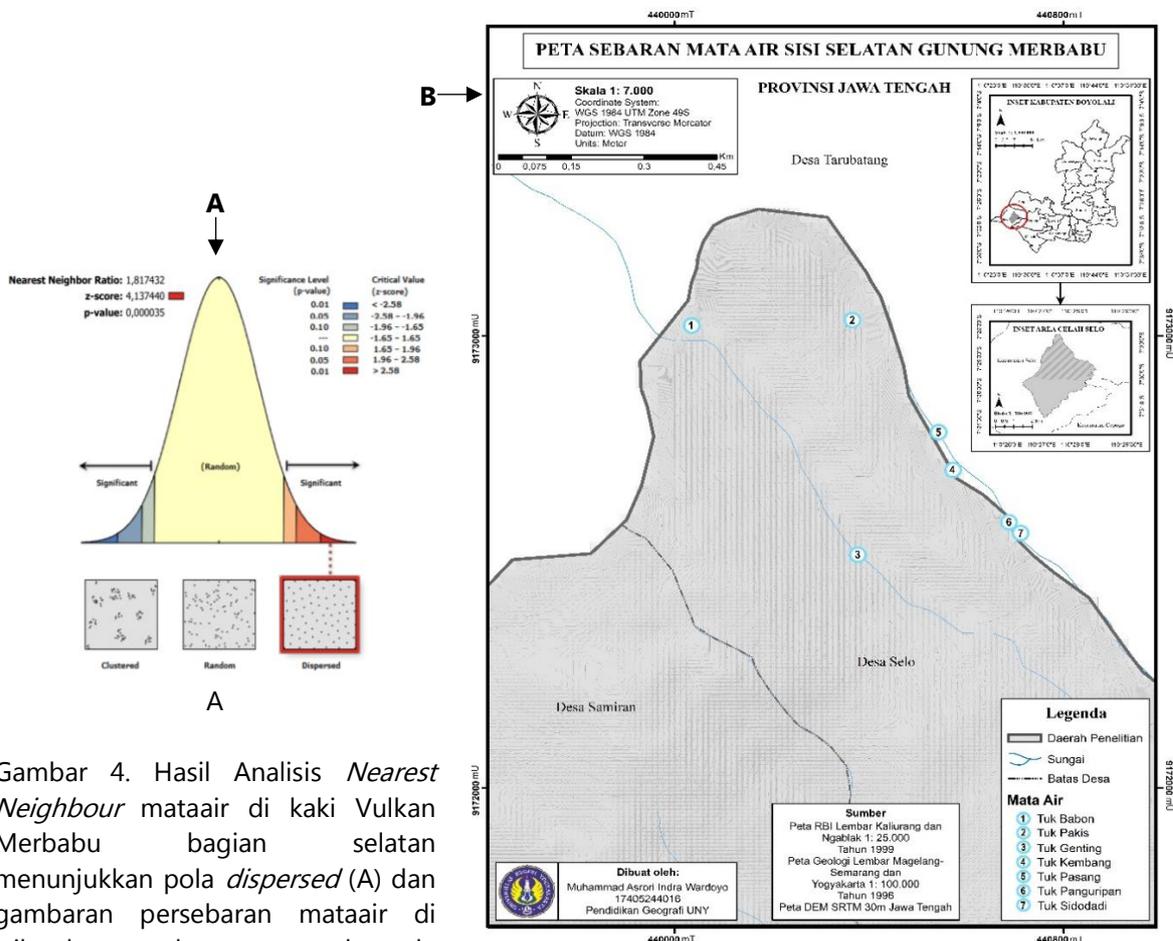


Gambar 3. Sebaran Mata Air Area Celah Selo

Tabel 2. Karakteristik Pemunculan Mata Air

No	Mata Air	Koordinat	Jenis Mata Air	Lokasi Pemunculan	Bentuklahan
1.	Tuk Babon	49- 440035 9173023	<i>Depression springs</i>	Tekuk Lereng	Kaki Vulkan Merbabu
2.	Tuk Pakis	49- 440366 9173035	<i>Depression springs</i>	Tekuk Lereng	Kaki Vulkan Merbabu
3.	Tuk Tegalseruni	49- 440098 9169446	<i>Contact springs</i>	Tekuk Lereng	Kaki Vulkan Merapi
4.	Tuk Genting	49- 440377 9172515	<i>Depression springs</i>	Lembah Sungai	Kaki Vulkan Merbabu
5.	Tuk Kembang	49- 440663 9172650	<i>Depression springs</i>	Lembah Sungai	Kaki Vulkan Merbabu
6.	Tuk Pasang	49- 440543 9172787	<i>Depression springs</i>	Lembah Sungai	Kaki Vulkan Merbabu
7.	Tuk Panguripan	49- 440688 9172588	<i>Depression springs</i>	Lembah Sungai	Kaki Vulkan Merbabu
8.	Tuk Sidodadi	49- 440712 9172564	<i>Depression springs</i>	Lembah Sungai	Kaki Vulkan Merbabu

Sumber: Pengukuran lapangan (2021)



Gambar 4. Hasil Analisis *Nearest Neighbour* mataair di kaki Vulkan Merbabu bagian selatan menunjukkan pola *dispersed* (A) dan gambaran persebaran mataair di wilayah tersebut yang berpola *dispersed* (B)

Temuan dalam penelitian ini juga menunjukkan bahwa mataair hanya dijumpai pada area kaki vulkan. Pada bentuklahan lereng dan dataran kaki vulkan tidak dijumpai mata air baik di tekuk lereng maupun lembah sungai. Hal tersebut mengindikasikan banyaknya jumlah resapan air yang terpotong pada wilayah kaki vulkan. Wilayah kaki vulkan memang menjadi tempat banyaknya pemunculan mata air pada stratovolcano jawa karena dari segi iklim, sumberdaya akuifer, dan daerah pemotongan air tanah seperti tekuk lereng dan lembah sungai sangat mendukung pembentukan mata air daripada wilayah satuan bentuklahan lainnya.

Pola persebaran mataair yang mengikuti lembah sungai radial di daerah penelitian ini sebenarnya juga bukanlah gejala yang khas. Pola serupa juga telah dijumpai dalam penelitian terdahulu antara lain di Vulkan Lawu (Santosa, 2006) serta bagian barat Vulkan Merapi (Aurita & Purwantara, 2017). Bahkan penelitian Ashari dan Widodo (2019), yang dilakukan di lereng barat daya Vulkan Merbabu juga menunjukkan fenomena pemunculan mata air yang sama. Karakteristik bentuklahan yang telah mengalami pelapukan atau sudah dalam fase denudasi merupakan penyebab dari munculnya pola persebaran ini. Biasanya mata air akan muncul pada daerah atasnya ketika mengalami erosi yang intensif, dan begitu pula sebaliknya jika terdapat gerakan massa, maka kemunculan mata air berada di bawahnya (Ashari, 2014; Ashari dan Widodo, 2019). Gejala seperti itu akan mendorong distribusi mata air pada perpindahan lereng dengan kaki vulkan menjadi lebih tidak teratur dibandingkan pola sabuk mata air yang normal.

Temuan paling menarik dari penelitian ini adalah pemunculan mata air pada sisi utara Vulkan Merapi yang hanya mempunyai satu mata air. Sebagai stratovulkano yang aktif, Vulkan Merapi lazimnya memiliki banyak mataair yang tersebar dalam pola sabuk mataair. Hal ini karena vulkan aktif menghasilkan banyak material lepas yang berperan sebagai akuifer produktif sehingga dapat menampung airtanah dalam jumlah banyak. Stratovulkano aktif juga memiliki bentuk kerucut dengan tekuk lereng yang tegas sehingga dapat mendorong timbulnya pemunculan mata air. Namun demikian, temuan dari sisi utara Vulkan Merapi ini ternyata menjumpai kondisi yang sebaliknya. Hasil survey di sisi utara Vulkan Merapi menunjukkan kelangkaan sumber mata air. Hanya

terdapat satu mata air yang ditemukan pada wilayah ini yaitu mata air Tegalsruni.

Kondisi ini ternyata disebabkan oleh faktor litologi di area ini. Jenis litologi dari Endapan Merapi Tua di Area Celah Selo membatasi produktivitas akuifer dan potensi pemunculan mataair. Gertisser dkk (2012) menjelaskan bahwa, endapan Merapi Tua mulai membangun stratovolcano dari material basaltik lava andesit dan batuan piroklastik selingan. Sementara itu Camus dkk (2000), menambahkan bahwa aliran lava breksi otomatis, *nue'es ardentes* (aliran abu dan piroklastik) dan endapan lahar menyusun bagian utama kerucut kuno di sisi utara.

Mata Air Tegalsruni yang berada pada lokasi satuan bentuk lahan kaki vulkan Merapi diperkirakan muncul diatas material batuan endapan vulkanik Vulkan Merapi tua (Qmo) pada susunan batuan andesit dan basalt. Material endapan Vulkan Merapi Muda dengan komposisi terdiri dari hamparan tuf, abu, breksi, aglomerat menutupi material tahan air dengan ketebalan yang relatif tipis. Perlapisan beberapa endapan yang bersifat porous di bagian atas dengan batuan beku yang relatif kompak dan bersifat kedap air di bagian bawah, akan menimbulkan pengaliran air tanah melalui batas perlapisan tersebut. Sehingga mata air yang terbentuk dapat disebut keluar sebagai mata air kontak. Keunikan ini juga ditemukan pada penelitian dari (Putri & Setyawan, 2015), juga membuktikan hanya terdapat satu mata air yang muncul pada lereng utara Vulkan Merapi.

Budiadi dkk (2017), menjelaskan bahwa terdapat mata air yang tidak berhubungan dengan morfologi daerah tersebut yaitu mata air kontak. Mata air kontak umumnya dikendalikan oleh berbagai jenis batuan atau karena perbedaan permeabilitas antara tanah dan batuan. Meskipun kadang-kadang muncul di lereng curam. Struktur geologi biasanya mengontrol terjadinya mata air yang disebabkan oleh permeabilitas yang berbeda. Penelitian Bennett dkk (2021), yang dilakukan di Stratovulkano Meru, Tanzania Utara, juga menunjukkan kelangkaan mata air pada sisi barat vulkan tersebut. Wilayah Mamsa yang berada di sisi barat, daerahnya kering dengan vegetasi langka, ada beberapa sumur gali dangkal dan hanya satu mata air di lereng tersebut. Salah satu faktor penyebab kelangkaan tersebut adalah materialnya berupa Nephelinite lava dan breksi dengan sifat *impermeable*.

Jika dibandingkan dari penelitian sebelumnya milik Aurita & Purwantara (2017) dan Ratih dkk (2018) yang merupakan penelitian pada kawasan lereng Barat dan Selatan Vulkan Merapi, pada lereng tersebut keterdapatannya banyak sekali mata air. Penelitian serupa Simoen (2001), yang mengkaji mata air pada Vulkan Merapi namun berada pada lereng timur dan tenggara juga mempunyai mata air sebanyak 14 buah. Berbagai penelitian di atas menunjukkan bahwa Vulkan Merapi memiliki potensial mataair yang tinggi. Namun demikian hal tersebut tidak berlaku pada sisi utara Vulkan Merapi.

Karakteristik Mata Air pada Area Celah Selo

Pengukuran debit mataair di lapangan menunjukkan kelas debit mata air yang bervariasi. Pada delapan sampel mata air dalam studi ini, terdapat varian kelas mulai dari yang tertinggi

berada pada kelas 4 dan yang paling rendah berada pada kelas 8 (Tabel 3). Pengukuran lapangan dalam penelitian ini dilakukan pada Bulan Maret-April 2021, yang menunjukkan kondisi akhir musim penghujan.

Data curah hujan tahunan Kecamatan Selo menunjukkan bahwa puncak hujan terjadi pada periode pergantian tahun, yaitu pada Bulan November-Desember serta Januari-Februari. Namun demikian debit mataair pada akhir musim penghujan ternyata masih cukup besar. Hal tersebut karena banyak mata air memiliki sifat *Perennial spring* yaitu mata air yang terus mengalirkan air sepanjang tahun. Mata air dengan debit yang besar biasanya digunakan oleh warga untuk memenuhi kebutuhan air domestik, sedangkan mata air dengan debit yang rendah biasanya digunakan untuk membantu irigasi lahan tegalan maupun kebun campuran.

Tabel 3. Variasi Debit Mata Air di Area Celah Selo

No	Mata Air	Debit Air (l/dt)	Kelas Debit Mata Air
1.	Tuk Babon	10 l/dt	IV
2.	Tuk Pakis	5 l/dt	V
3.	Tuk Tegalseruni	0,006 l/dt	VIII
4.	Tuk Genting	0,007 l/dt	VIII
5.	Tuk Kembang	0,25 l/dt	VI
6.	Tuk Pasang	0,33 l/dt	VI
7.	Tuk Panguripan	0,008 l/dt	VIII
8.	Tuk Sidodadi	0,02 l/dt	VII

Sumber: Pengukuran lapangan (2021)

Pada wilayah Vulkan Merbabu ditemukan mataair dengan debit yang bervariasi antara kelas IV hingga VIII. Tuk Babon (10 l/dt) yang termasuk dalam kelas IV terletak berdekatan dengan Tuk Pakis (5 l/dt) yang termasuk dalam kelas V. Lokasi kedua mata air dengan debit paling besar ini berada pada tekuk lereng di satuan bentuk lahan kaki vulkan Merbabu. Satu-satunya mataair yang dijumpai di wilayah Vulkan Merapi memiliki debit yang sangat kecil.

Variasi debit mata air ini mengindikasikan perbedaan kondisi akuifer di daerah penelitian. Wilayah sisi utara Vulkan Merapi yang hanya memiliki satu mataair dengan debit sangat kecil menandakan potensi akuifer pada wilayah itu sangat rendah. Walaupun Vulkan Merbabu termasuk kedalam vulkan yang tua dan mulai terdenudasi, namun material endapannya masih tergolong baik untuk menyimpan dan

meresapkan air hujan. Temuan debit dalam penelitian ini memiliki persamaan dan perbedaan dengan hasil penelitian terdahulu. Hal tersebut tidak lepas dari potensi akuifer di setiap wilayah yang dipengaruhi oleh kondisi lokal wilayah tersebut.

Pengukuran kualitas air in situ dengan parameter suhu air, pH, *Dissolved Oxygen* (DO), *Electric Conductivity* (EC), dan *Total Dissolved Solid* (TDS) mendapatkan beberapa hasil yang bervariasi (Tabel 4). Data hasil pengukuran menunjukkan bahwa kondisi kualitas air di berbagai mataair Vulkan Merbabu relatif tidak jauh berbeda. Sementara itu Mataair Tegalseruni sebagai satu-satunya mataair di wilayah Vulkan Merapi ternyata memiliki DHL dan TDS yang sangat mencolok. Kondisi ini menjadikan anomali jika dibandingkan dengan mataair lainnya di daerah penelitian.

Lahan yang subur di wilayah Merapi ini banyak dimanfaatkan sebagai lahan tegalan. Kandungan zat terlarut dari sisa penggunaan pupuk maupun bahan kimia serta pengolahan tanah diduga

memperbesar proses infiltrasi yang menyebabkan peningkatan zat terlarut. Kondisi inilah yang selanjutnya memicu peningkatan daya hantar listrik dalam air.

Tabel 4. Kualitas Air Mata Air Hasil Pengukuran In Situ

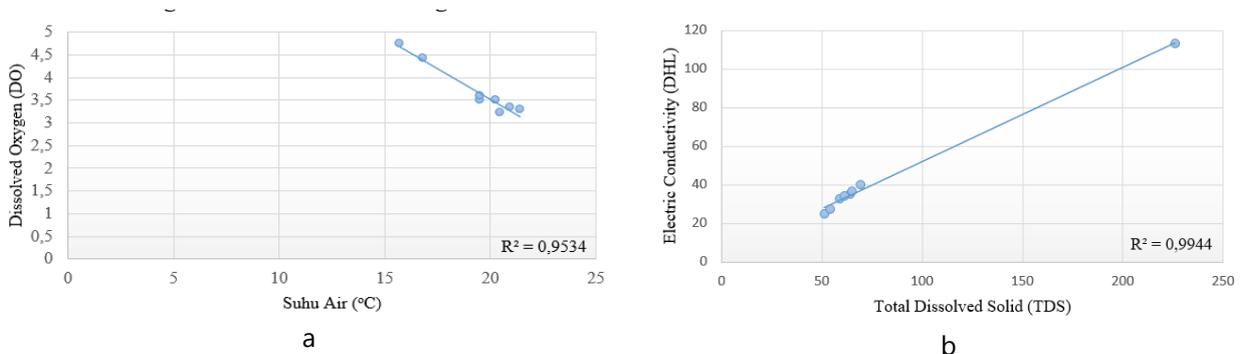
No	Mata Air	Ketinggian Tempat (Mdpl)	Kualitas Air (Multiparameter Meter)				
			Suhu (°C)	pH	DO (ppm)	DHL (µS/cm)	TDS (ppm)
1.	Tuk Babon	1905 m	15,71	6	4,75	51	25
2.	Tuk Pakis	1866 m	16,83	6	4,42	54	27
3.	Tuk Tegalseruni	1723 m	20,95	6	3,35	226	113
4.	Tuk Genting	1800 m	19,52	6	3,59	61	34
5.	Tuk Kembang	1754 m	19,49	6	3,5	59	33
6.	Tuk Pasang	1764 m	21,42	6	3,3	69	40
7.	Tuk Panguripan	1755 m	20,22	6	3,5	64	35
8.	Tuk Sidodadi	1765 m	20,44	6	3,22	65	37

Sumber: Pengukuran lapangan (2021)

Diantara berbagai parameter kualitas air tersebut terdapat hubungan saling mempengaruhi. Suhu air berpengaruh kuat dengan DO ($R^2 = 0,95$). Mataair dengan suhu lebih tinggi memiliki DO yang rendah. Hal ini sesuai dengan penjelasan Davie (2008), bahwa air hangat akan menahan oksigen terlarut lebih sedikit daripada air dingin. Oleh karena itu, semakin tinggi suhu mataair maka nilai DO akan semakin rendah (Gambar 5a).

Suhu air juga berpengaruh terhadap DHL. Davie (2008) menjelaskan bahwa suhu air juga berpengaruh terhadap DHL selain faktor lain seperti keberadaan sedimen. Hasil analisis menunjukkan peningkatan suhu berpengaruh terhadap peningkatan DHL namun sangat lemah ($R^2 = 0,26$). Sementara itu, hubungan antara TDS dengan DHL (99%) lebih kuat dibandingkan suhu

dengan DHL. Hal ini menunjukkan bahwa TDS lebih berpengaruh terhadap peningkatan DHL mataair di daerah penelitian (Gambar 5b). Anomali TDS di Mataair Tegalseruni ternyata juga diikuti oleh anomali DHL yang juga jauh lebih tinggi dibandingkan mataair lainnya yang berada di wilayah Vulkan Merbabu. Temuan ini selaras dengan penjelasan Davie (2008), bahwa terdapat korelasi antara DHL dengan TDS. Kemampuan sampel air untuk mentransmisikan arus listrik (konduktivitasnya) berbanding lurus dengan konsentrasi ion terlarut. Hal serupa juga dijumpai pada penelitian sebelumnya oleh Putri dan Setyawan (2015), yang menunjukkan bahwa nilai DHL pada Mata Air Tegaseruni lebih besar dari pada mata air lainnya dengan nilai 203 µS/cm dan berasumsi bahwa Mata Air Tegalsruni memiliki lebih banyak kandungan garam terlarut.



Gambar 5. Hubungan antar parameter kualitas air. (a) hubungan antara suhu air dengan DO, (b) hubungan antara TDS dengan DHL

Temuan hasil studi ini memperkuat temuan sebelumnya dari Putri & Setyawan (2015), bahwa banyaknya garam terlarut menunjukkan mata air di Vulkan Merapi yang aktif mensuplai ion terlarut lebih tinggi daripada mata air di Vulkan Merbabu yang tidak aktif. Ashari & Widodo (2019), juga menjelaskan bahwa tingginya intensitas hujan pada lereng atas mendorong fungsi daerah ini sebagai zona resapan. Peningkatan DHL mata air dipengaruhi oleh peningkatan TDS.

Hasil pengukuran pH air mataair menunjukkan angka 6. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh mata air di daerah penelitian cenderung bersifat masam. Lokasi mata air pada bentuklahan vulkanik mempengaruhi kadar keasaman ini. Batuan beku terutama mineral feldspar akan mempengaruhi evolusi kimia air dimana air hujan yang meresap melalui material ini akan diubah dari air segar menjadi sedikit asam (Freeze & Cherry, 1979). Penggunaan lahan tegalan juga diduga berpengaruh terhadap keasaman air mata air. Penggunaan bahan kimia untuk pupuk dan pestisida menyebabkan tanah lebih asam dan mempengaruhi keasaman air yang melindi material tersebut.

Simpulan

Hasil studi ini menunjukkan bahwa kondisi geomorfologi sangat berpengaruh terhadap pola pemunculan mataair. Selain itu, kondisi litologi juga menentukan eksistensi mataair. Vulkan Merapi yang aktif dan diduga memiliki banyak mataair ternyata justru sangat minim mataair, karena studi dilakukan pada bagian tua dari vulkan aktif ini. Kombinasi proses geomorfik dan litologi perlu dipertimbangkan dalam studi mengenai pemunculan dan pola persebaran mataair. Karakteristik kualitas dan kuantitas air mataair juga berkaitan dengan litologi yang berkombinasi dengan aktivitas manusia. Wilayah Celah Selo secara umum memiliki potensi mata air yang baik terutama di area Vulkan Merbabu. Potensi mata air ini dapat digunakan untuk mendorong pertumbuhan pariwisata dan penanganan bencana di wilayah ini.

Studi ini masih sangat sedikit membahas keterkaitan antara proses vulkanisme, material hasil vulkanisme, serta perlapisan material hasil vulkanisme terhadap eksistensi dan persebaran mata air pada bentangkahan vulkanik. Studi lebih lanjut pada masa mendatang sangat direkomendasikan untuk membahas aspek ini,

serta pembahasan yang komprehensif mengenai hidrogeomorfologi pada tubuh vulkan strato dengan variasi morfologi dan litologinya.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada aparat desa dan juru kunci mata air, yang telah memberikan ijin penelitian serta pendampingan dalam pengukuran lapangan. Penulis juga mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Bapak Arif Ashari atas berbagai diskusi mengenai temuan penelitian ini dibandingkan dengan temuan dari berbagai penelitian sejenis. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada reviewer yang telah memberikan saran perbaikan artikel ini sehingga dapat memenuhi standar untuk penerbitan.

Referensi

- Ashari, A. (2014). Distribusi Spasial Mata air Kaitannya dengan Keberadaan Situs Arkeologi di Kaki Lereng Timur Gunungapi Sindoro Antara Parakan dan Ngadirejo Kabupaten Temanggung. *Posiding Conference: Mega Seminar Nasional Geografi*.
- Ashari, A., & Widodo, E. (2019). Hidrogeomorfologi Dan Potensi Mataair Lereng Baratdaya Gunung Merbabu. *Majalah Geografi Indonesia*, 33(1), 48–56. <https://doi.org/10.22146/mgi.35570>
- Ashari, A., Purwantara, S., Arif, N., & Widodo, E. (2021). Spatial Evolution of the River Valleys under the Influence of Active Volcano: A Case of Merapi Volcanic Plain. *Quaestiones Geographicae* 40(3), 45-64.
- Aurita, R. P., & Purwantara, S. (2017). Karakteristik Mataair Kaki Lereng Gunung Merapi dan Pemanfaatannya di Kecamatan Dukun Kabupaten Magelang. *Geomedia*, 15(1), 75–80.
- Badan Pusat Statistik Kecamatan Selo. (2020). *Kecamatan Selo dalam Angka Tahun 2020*. BPS Kabupaten Boyolali.
- Bennett, G., Van Reybrouck, J., Shemsanga, C., Kisaka, M., Tomašek, I., Fontijn, K., Kervyn, M., & Walraevens, K. (2021). Hydrochemical characterisation of high-fluoride groundwater and development of a conceptual groundwater flow model using a combined hydrogeological and hydrochemical approach on an active

- volcano: Mount Meru, Northern Tanzania. *Water (Switzerland)*, 13(16).
<https://doi.org/10.3390/w13162159>
- Budiadi, E., Listyani, T., & Putro, C. U. (2017). Morphological Aspects At Girimulyo and Its Surrounding Area, West Progo. *Kurvatek*, 2(2), 45–54.
<https://doi.org/10.33579/krvtk.v2i2.540>
- Camus, G., Gourgaud, A., Mossand-Berthommier, P. C., & Vincent, P. M. (2000). Merapi (Central Java, Indonesia): An outline of the structural and magmatological evolution, with a special emphasis to the major pyroclastic events. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100(1–4), 139–163.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00135-9)
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of Hydrology 2nd Edition*. Routledge.
- Freeze, R. A., & Cherry, John, A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc.
- Gertisser, R., Charbonnier, S. J., Keller, J., & Quidelleur, X. (2012). The geological evolution of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 74(5), 1213–1233. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0591-3>
- Hartono, H. G., & Sudradjat, D. A. (2018). Karakteristik Geomorfologi Gunung Api Aktif dan Gunung Api Padam: Kasus G. Merapi & G. Gajahmungkur, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. *Bulletin of Scientific Contribution*, 16(2), 109–116.
<http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
- Masruri, S. M., & Ashari, A. (2015). Penyusunan Informasi Geomorfologis dengan Metode Survei Geomorfologikal Analitikal untuk Mendukung Pengelolaan Kebencanaan dan Lingkungan di Lereng Baratdaya Gunungapi Merbabu. *Prosiding Seminar Nasional Emantapan Profesionalisme Pendidik Geografi Di Era MEA*.
- Mulyaningsih, S., Hidayat, S., & Rumanto, A. (2015). *Identifikasi Karakteristik Aktivitas Gunung Api Merbabu Didasarkan Pada Petrologi dan Vulkanostratigrafi*.
- Nurhadi, N., Ashari, A., & Suparmini, S. (2015). Kajian Bahaya Erupsi Dan Longsor Pada Lembah Antar Gunungapi Merapi-Merbabu Jawa Tengah. *Jurnal Penelitian Saintek*, 20(1).
<https://doi.org/10.21831/jps.v20i1.5606>
- Putri, F. K., & Setyawan, P. (2015). Karakteristik dan Potensi Mataair di Sebagian Wilayah Taman Nasional Gunung Merbabu Taman Nasional Gunung Merapi dan Sekitarnya. *Jurnal Bumi Indonesia*, 4(2), 41–48.
- Ratih, S., Awanda, H. N., Saputra, A. C., & Ashari, A. (2018). Hidrogeomorfologi Mataair Kaki Vulkan Merapi Bagian Selatan. *Geomedia*, 16(1), 25–36.
- Ratih, S., Awanda, H.N., Saputra, A.C., & Ashari, A. (2019). Volcanic Springs, An Alternative Emergency Water Resource to Support Sustainable Disaster Management in Southern Flank of Merapi Volcano. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 271(1), 012012.
- Santosa, L. W. (2006). Kajian Hidrogeomorfologi Mataair di Sebagian Lereng Barat Gunungapi Lawu. *Forum Geografi*, 20(1), 68–85.
<https://doi.org/10.23917/forgeo.v20i1.1805>
- Sarkowi, M. (2010). Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Gunung Merbabu–Merapi Berdasarkan Pemodelan 3D Anomali Bouguer. *Berkala Fisika*, 13(2), 11–18.
- Setyawati, S., Hadi, B.S., & Ashari, A. (2013). Pengembangan Sistem Informasi Bahaya Erupsi untuk Pengelolaan Kebencanaan di Lereng Selatan Gunungapi Merapi. *Majalah Geografi Indonesia*, 27(2), 138–148.
- Simoen, S. (2001). Sistem Akuifer di Lereng Gunungapi Merapi Bagian Timur dan Tenggara. *Majalah Geografi Indonesia*, 15(1), 1–16.
- Sutikno, Santosa, L. W., Widiyanto, Andri, K., & Heri, P. T. (2007). *Kerajaan Merapi, Sumberdaya Alam dan Daya Dukungnya*. BPFM UGM.
- Syahidah, K., Sumarno, & Sri, H. (2016). Pemetaan Status Kerusakan Tanah Lahan Pertanian di Kecamatan Selo, Kabupaten Boyolali Mapping Status of Soil Damage on Agricultural Land at Selo District, Boyolali Regency. *Agrosains*, 18(1), 6–11.
- Van Bemmelen, R. . (1949). *The Geology of Indonesia: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes* (V. IA (ed.)). Government Printing Office.
- Verstappen, H. T. (2013). *Garis Besar Geomorfologi Indonesia*. Gadjah Mada University Press.