

KARAKTERISASI HIDROSTRATIGRAFI BERBASIS GEOLISTRIK UNTUK IDENTIFIKASI AKUIFER DI LERENG TIMUR GUNUNG API UNGARAN

(Goelectric-Based Hydrostratigraphic Characterization for Aquifer Identification on the Eastern Slope of Ungaran Volcano)

Endra Yuliawan¹, Sonna Diwijaya¹, Hilmy Ahmad¹, Tjahyo Nugroho Adji^{1,*}, dan Ahmad
Cahyadi¹

¹Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

*Email: adji_tjahyo@ugm.ac.id

Diterima: 17 Juli 2025, Direvisi: 1 September 2025, Disetujui: 9 September 2026

ABSTRACT

The eastern slope of Ungaran Volcano is an area under high pressure for clean water needs due to population growth, the expansion of residential, and industrial areas. This study aims to identify and characterize the aquifer system through a hydrostratigraphic approach that integrates Vertical Electrical Sounding (VES) data from nine measurement points, borehole log data to a depth of 35 m, and geological and geomorphological information. The research results show the presence of two main aquifer systems, namely unconfined aquifers and confined aquifers. The unconfined aquifer is widely distributed in the central and eastern regions, particularly in the geomorphological unit of the Middle Slope Young Ungaran Pyroclastic Flow (VM6), which is dominated by porous lahar deposits. Meanwhile, the confined aquifer is identified in the northeastern zone, characterized by lahar layers trapped between impermeable rock formations of lava and fine tuff. The interpretation of rock resistivity shows that lahar deposits (10–100 Ω m) act as an aquifer, lava (>100 Ω m) as an aquifuge, and tuff (<10 Ω m) as an aquiclude. The 2D and 3D hydrostratigraphic models produced clearly illustrate the spatial distribution of aquifers, where the greatest groundwater potential is found in the eastern, central, and part of the northern regions. In contrast, the western and southern regions are dominated by lava rock, which has low aquifer potential. This finding provides an important scientific basis for the sustainable management and utilization of groundwater resources in volcanic areas.

Keywords: *Hydrostratigraphy; aquifer; geoelectrical method; Ungaran Volcano*

ABSTRAK

Lereng timur Gunung api Ungaran merupakan kawasan dengan tekanan tinggi terhadap kebutuhan air bersih akibat pertumbuhan penduduk, perluasan kawasan permukiman, dan

industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengarakterisasi sistem akuifer melalui pendekatan hidrostratigrafi dengan mengintegrasikan data geolistrik metode *Vertical Electrical Sounding* (VES) pada 9 titik pengukuran, data log bor hingga kedalaman 35 meter, serta data geologi dan geomorfologi. Hasil penelitian menunjukkan adanya dua sistem akuifer utama, yaitu akuifer bebas dan akuifer tertekan. Akuifer bebas tersebar luas di wilayah tengah dan timur, khususnya pada satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), yang didominasi oleh endapan lahar berpori. Sementara itu, akuifer tertekan teridentifikasi pada zona timur laut, dengan karakteristik lapisan lahar yang terjebak antara batuan kedap berupa lava dan tuf halus. Interpretasi resistivitas batuan menunjukkan bahwa endapan lahar (10–100 Ωm) berperan sebagai akuifer, lava (>100 Ωm) sebagai akuifug, dan tuf (<10 Ωm) sebagai akuiklud. Model hidrostratigrafi 2D dan 3D yang dihasilkan menggambarkan sebaran spasial akuifer secara jelas, dengan potensi air tanah terbesar berada di wilayah timur, tengah, dan sebagian utara. Sebaliknya, wilayah barat dan selatan didominasi oleh batuan lava yang memiliki potensi akuifer rendah. Temuan ini memberikan dasar ilmiah yang penting bagi pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya air tanah secara berkelanjutan di kawasan vulkanik.

Kata kunci: Hidrostratigrafi; akuifer; metode geolistrik; gunung api Ungaran

I. PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu sumber daya di bumi yang memiliki banyak manfaat bagi kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya. Perkembangan penduduk dan meluasnya permukiman menjadikan kebutuhan sumber air bersih meningkat (Hanif *et al.*, 2025). Nugraha *et al.* (2023) menyatakan bahwa permintaan air semakin meningkat dikarenakan adanya urbanisasi, perubahan iklim, dan perubahan penggunaan lahan yang menyebabkan tekanan terhadap penyediaan air tanah. Hal ini tentunya menimbulkan permasalahan terkait sumber daya air, baik air permukaan maupun air tanah. Air tanah merupakan air yang sering dimanfaatkan dalam pemenuhan kebutuhan domestik, industri, dan sektor lainnya (Wang *et al.*, 2022).

Perubahan penggunaan lahan dari lahan tidak terbangun menjadi kawasan

permukiman, perdagangan, jasa, dan industri di wilayah Kota Ungaran tidak hanya meningkatkan kebutuhan air, tetapi juga berpotensi meningkatkan tekanan terhadap ketersediaan sumber daya air setempat. Darmawan *et al.* (2021) menyatakan bahwa peningkatan kepadatan populasi di Kota Semarang telah mendorong pergeseran area permukiman dari pusat kota ke kota satelit seperti wilayah Kota Ungaran di Kabupaten Semarang. Kondisi tersebut diikuti oleh konversi lahan pertanian menjadi kawasan permukiman, perdagangan, dan jasa (Atsamari & Pigawati, 2024). Peningkatan kebutuhan air yang mengikuti perkembangan kawasan terbangun tersebut pada akhirnya meningkatkan tekanan terhadap sistem penyediaan air bersih di Ungaran. Tekanan terhadap ketersediaan air tersebut tercermin dari krisis air bersih yang terjadi di wilayah

Ungaran (Jamilah, 2021). Keluhan masyarakat terhadap kelangkaan air bersih mendorong Forum Komunikasi Pelanggan (FKP) PDAM untuk meninjau langsung kondisi Sumber Kalidoh di wilayah administratif Kabupaten Semarang, yang dikelola oleh PDAM Kota Semarang. Kondisi ini menunjukkan pentingnya identifikasi dan pemahaman sistem akuifer serta hidrostratigrafi di lereng timur Gunung api Ungaran untuk mendukung keberlanjutan penyediaan air bersih.

Pemahaman yang kuat mengenai sistem hidrostratigrafi menjadi kunci dalam mengatasi tantangan ini dan menjamin pemanfaatan air tanah yang efisien (Awadh *et al.*, 2021). Dalam hal ini, penelitian geohidrologi yang komprehensif dapat membantu perencanaan dan pengelolaan sumber daya air yang lebih efektif, serta mencegah terjadinya krisis serupa di masa mendatang. Akuifer di daerah gunung api memiliki ciri hidrogeologi yang khas, dipengaruhi oleh material vulkanik, struktur geologi, dan proses hidrogeokimia (Baud *et al.*, 2024; Christensen *et al.*, 2020). Sebagai contoh, komposisi material vulkanik, seperti yang terdapat di wilayah Chimborazo, berperan penting dalam pembentukan akuifer berlapis yang memungkinkan terjadinya aliran air tanah yang kompleks (Procel *et al.*, 2023). Penyusun utama akuifer di daerah gunung api berupa lava, breksi vulkanik, tuf, dan endapan piroklastik (laharik) dengan porositas dan permeabilitas yang bervariasi. Retakan, rekahan, serta pelapukan batuan menghasilkan porositas sekunder yang penting bagi penyimpanan dan pergerakan air tanah serta peran struktur geologi dalam kapasitas penyimpanan air tanah

(Bennett *et al.*, 2022; Betterle & Bellin, 2024). Struktur geologi seperti sesar dan patahan juga memegang peranan sebagai jalur utama aliran, membentuk sistem akuifer yang kompleks dan beragam di zona jenuh. Diamond *et al.* (2019) menjelaskan bahwa keberadaan akuifer dapat diidentifikasi dengan melakukan analisis hidrostratigrafi untuk menggambarkan kondisi lapisan penyimpan air berupa susunan lapisan akuifer, ketebalan, dan urutan perlapisan. Data hidrostratigrafi dapat diperoleh dari pengukuran geofisika (survei geolistrik) dan data lubang bor yang dijadikan sebagai validasi perlapisan batuan (Fabien-Ouellet & Gloaguen, 2014). Survei geolistrik sebagai salah satu metode geofisika memanfaatkan sifat kelistrikan batuan, khususnya resistivitas, untuk menyelidiki struktur bawah permukaan dan sangat penting dalam eksplorasi air tanah, mineral, serta studi lingkungan (Binley, 2015). Metode geolistrik efektif dalam menemukan akuifer dengan mengidentifikasi variasi resistivitas yang mengindikasikan zona jenuh air (Patra *et al.*, 2016; Zuhdi *et al.*, 2023). Resistivitas batuan berkaitan erat dengan keberadaan air tanah karena air bertindak sebagai konduktor yang lebih baik dibandingkan mineral penyusun batuan, sehingga meningkatnya kandungan air akan menurunkan nilai resistivitas (Lowrie, 2007). Park *et al.* (2016) menjelaskan bahwa resistivitas batuan umumnya menurun dengan meningkatnya porositas dan saturasi air, meskipun pengaruhnya dapat bervariasi tergantung pada komposisi mineral dan struktur pori. Selain itu, peningkatan resistivitas pada fluida berpori juga dapat meningkatkan

resistivitas batuan, kecuali pada rentang 20–80 Ωm dimana pengaruhnya relatif kecil.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi hidrostratigrafi guna mengidentifikasi keberadaan dan karakteristik akuifer di lereng timur Gunung api Ungaran, sebuah kawasan yang mengalami peningkatan kebutuhan air akibat urbanisasi dan alih fungsi lahan. Studi ini penting untuk mengisi kekosongan riset terkait keterbatasan data bawah permukaan pada sistem akuifer gunung api yang kompleks, khususnya integrasi antara data geolistrik, geologi, dan geomorfologi. Nouradine *et al.* (2024) menyatakan bahwa menggabungkan data geologi, geomorfologi, dan geofisika dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai sistem akuifer, sehingga meningkatkan penilaian terhadap sumber daya air tanah. Dengan menggabungkan metode *Vertical Electrical Sounding* (VES) dan data bor, penelitian ini menghasilkan model hidrostratigrafi 1D, 2D, dan 3D yang menggambarkan distribusi akuifer bebas dan tertekan secara lebih akurat. Secara praktis, hasil riset ini dapat menjadi dasar pengelolaan dan eksploitasi air tanah yang tepat sasaran, terutama untuk perencanaan konstruksi sumur gali dan bor. Secara akademik, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pemahaman sistem akuifer gunung api dan dapat menjadi referensi metodologis bagi studi sejenis di wilayah vulkanik lainnya.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

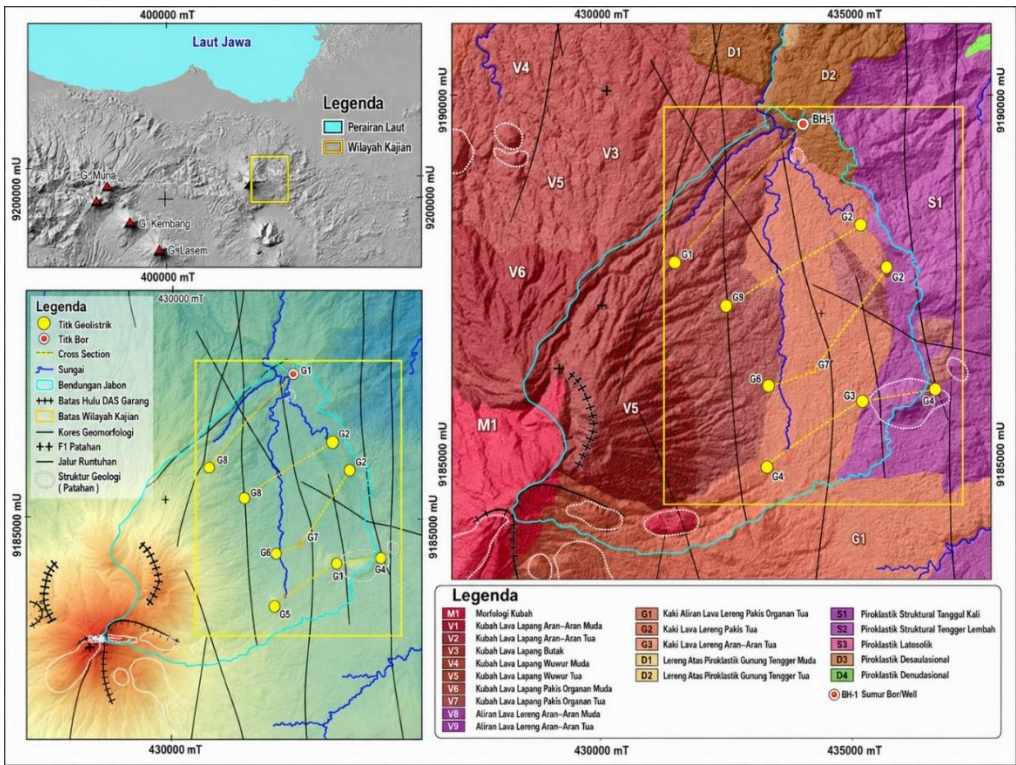
Penelitian ini dilakukan pada September hingga November 2024 dan secara

geografis berlokasi di lereng timur Gunung api Ungaran, lebih tepatnya di sebagian wilayah sisi timur Gunung api Ungaran, wilayah Kabupaten Semarang. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah survei lapangan dan penggunaan data sekunder. Survei lapangan dilakukan secara langsung untuk memperoleh nilai resistivitas batuan dari pengukuran geolistrik di lapangan, sedangkan data sekunder yang digunakan meliputi data geomorfologi, data geologi, dan data log bor. Lokasi pengukuran geolistrik ditentukan menggunakan *purposive sampling* dengan satuan geomorfologi sebagai dasar utama dalam pemilihan titik. Titik pengukuran dipilih untuk mewakili variasi satuan geomorfologi dan kondisi geologi pada lereng timur Gunung api Ungaran, mulai dari satuan yang didominasi aliran lava hingga satuan aliran piroklastik dan bentuk lahan vulkanik-struktural. Pemilihan lokasi juga mempertimbangkan posisi topografi, keberadaan indikasi pemanfaatan air tanah seperti sumur gali, serta aksesibilitas untuk pembentangan elektroda di lapangan. Peta geomorfologi, peta geologi, DEMNAS, dan citra *Google Earth* digunakan pada tahap awal untuk menentukan kandidat lokasi pengukuran. Berdasarkan kriteria tersebut, ditetapkan sembilan titik *Vertical Electrical Sounding* (VES), yaitu G1–G9, yang diharapkan dapat merepresentasikan variasi hidrostratigrafi pada lereng timur Gunung api Ungaran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1

B. Bahan dan Alat

Alat penelitian yang digunakan berfungsi untuk memperoleh, mengolah,

dan menganalisis data, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Bahan di dalam penelitian ini digunakan sebagai media pendukung untuk mengetahui karakteristik wilayah dan memperoleh data penelitian, seperti disajikan pada Tabel 2.



Gambar (Figure) 1. Kondisi geomorfologi dan persebaran titik pengukuran geolistrik (*Geomorphological conditions and distribution of geoelectric measurement points*)
Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

Tabel (Table) 1. Alat penelitian beserta fungsinya (*Research tools and their functions*)

No.	Nama Alat	Fungsi
1.	Aplikasi Avenza Maps	Menentukan titik koordinat pengukuran dan plotting di lapangan
2.	Meteran	Mengukur tinggi muka air tanah pada sumur dan jarak elektroda saat pengukuran geolistrik.
3.	Alat Geolistrik beserta perlengkapannya	Mengidentifikasi nilai resistivitas batuan untuk mengetahui karakteristik akuifer bawah permukaan
4.	Laptop	Mengolah data, input data dan media penyusunan laporan
5.	Software QGIS	Membuat analisis dan visualisasi data spasial (peta)
6.	Software Progress	Mengolah dan menganalisis data geolistrik serta sebagai modelling penampang melintang
7.	Software RockWorks	Memodelkan pemodelan data geolistrik menjadi model 2D dan 3D
8.	Software Google Earth	Mengetahui elevasi dan kondisi ruang di atas permukaan bumi
9.	Checklist Lapangan	Mencatat dan inventarisasi data lapangan

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

Tabel (Table) 2. Bahan penelitian dan fungsinya (*Research materials and their functions*)

No.	Bahan	Sumber	Fungsi
1.	Peta Geologi Gunung api Ungaran skala 1 : 50.000	ESDM	Mengetahui kondisi geologi wilayah Gunung api Ungaran dan sekitarnya, serta sebagai bahan pertimbangan penentuan titik geolistrik.
2.	Peta Geomorfologi Gunung api Ungaran skala 1 : 50.000	Marin <i>et al.</i> (2015)	Mengetahui kondisi geomorfologi wilayah Gunung api Ungaran serta sebagai bahan pertimbangan penentuan geomorfologi vulkanik dan titik geolistrik.
3.	DEMNAS lembar Ungaran	BIG	Mengetahui kondisi topografi wilayah kajian
4.	Peta Rupabumi Indonesia Digital	BIG	Mengetahui kondisi geografis terutama administratif wilayah kajian
5.	Citra Satelit Google Earth	Google	Mengetahui kondisi tutupan lahan serta sebagai survei awal dalam menentukan titik geolistrik.

Sumber (*Source*): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

C. Metode Penelitian

Metode geolistrik yang digunakan adalah *Vertical Electrical Sounding* (VES) dengan konfigurasi elektroda Schlumberger. Pengukuran nilai resistivitas batuan dilakukan dengan menginjeksikan arus antara sepasang elektroda dan mengukur perbedaan potensial yang dihasilkan pada permukaan antara sepasang elektroda lainnya (Phanjaya *et al.*, 2022). Metode geolistrik mengacu persamaan 1.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Persamaan 1 merupakan rumus resistansi yang digunakan pada medium silinder, sedangkan rumus resistivitas pada bahan medium sesuai dengan Persamaan 2.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2)$$

dimana :

V = beda potensial (V)

R = resistansi (Ω)

I = arus listrik (Amper)

ρ = resistivitas bahan (Ωm)

A = luas penampang medium (m^2)

L = panjang medium (m)

Akuisisi data pada survei lapangan dilakukan menggunakan alat *resistivity meter* dengan 4 buah elektroda. Dua

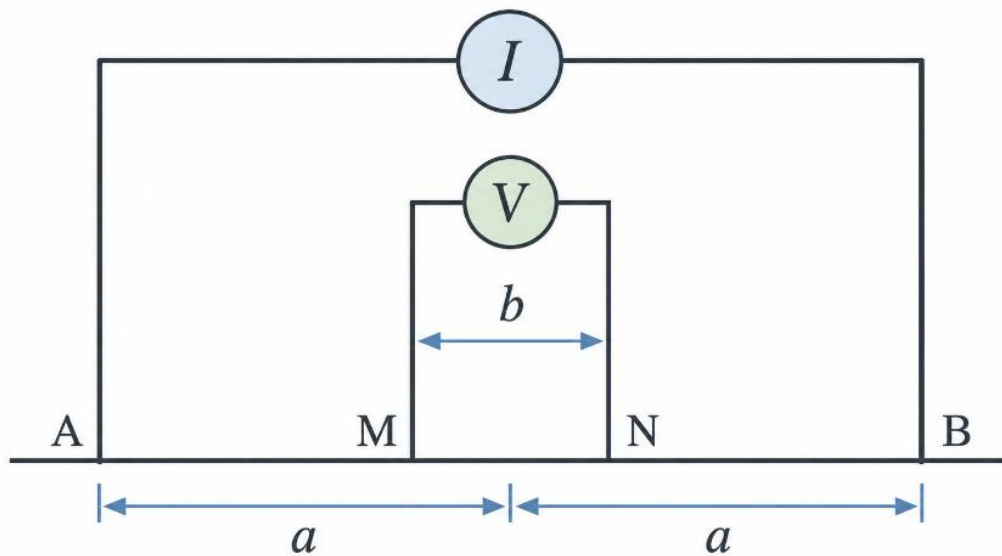
elektroda arus (A dan B) dipasang dengan jarak X_{ab} , sedangkan elektroda potensial (M dan N) dipasang dengan jarak X_{mn} seperti yang tersaji pada Gambar 2. Sementara itu, data yang diperoleh saat pengukuran di lapangan berupa arus listrik (I) dan beda potensial (tegangan, V). Nilai resistivitas diperoleh dari perhitungan seperti pada rumus (1) dan dilakukan perhitungan resistivitas semu (*apparent resistivity*) karena lapisan bawah bumi merupakan sistem berlapis (Muhardi *et al.*, 2019). Perhitungan resistivitas semu (*apparent resistivity*) mengacu pada Persamaan 3.

$$\rho_a = \pi \left[\frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \right] \cdot \frac{V}{I} \quad (3)$$

Selanjutnya, data resistivitas semu diinversi menggunakan bantuan *software Progress v.30* dan pembuatan *cross-section* hidrostratigrafi dilakukan dengan *software RockWorks 17* (Admin, 2025). Penelitian ini menggunakan analisis deskriptif kuantitatif untuk menilai nilai resistivitas batuan, sehingga dapat diidentifikasi jenis material batuan yang berperan dalam menentukan keberadaan akuifer (Tabel 3). Setelah jenis material

diketahui, dilakukan perbandingan dengan jenis material batuan dari data bor yang tersedia, untuk mendapatkan hubungan antara lapisan pembawa air di bawah

permukaan (hidrostratigrafi), geologi, dan distribusi geomorfologi vulkanik, sehingga diperoleh potensi keberadaan akuifer pada masing-masing unit geomorfologi.



Gambar (Figure) 2. Susunan elektroda Schlumberger (Schlumberger electrode array)

Sumber (Source): GreyMatters Global (2023)

Tabel (Table) 3. Korelasi nilai antara resistivitas dan material batuan (Correlation of resistivity values and rock materials)

No.	Tipe Batuan	Rentang Resistivitas (Ωm)
1.	Fine tuff	5 – 11
2.	Claystone	5 – 11
3.	Tuffaceous sandstone (groundwater potential)	14 – 90
4.	Volcanic breccia, fragments facies	90 – 290
5.	Andesite	4.5×10^4 (basah) - 1.7×10^2 (kering) atau 354 – 613
6.	Lava	$102 - 5 \times 10^4$
7.	Basalt	$103 - 1.3 \times 10^7$ (kering)
8.	Conglomerate	$2 \times 10^3 - 10^4$
9.	Sandstone	$1 - 6.4 \times 10^8$
10.	Unconsolidated clay (wet)	20
11.	Clay	1 – 100
12.	Bedrock: well fractured to slightly fractured with moist material in cracks	150 – 300
13.	Bedrock: slightly fractured with dry material in cracks	300 – 2400

Sumber (Source) :Telford *et al.* (2004); Arifianto *et al.* (2017); Manyoe & Hutagalung (2020)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

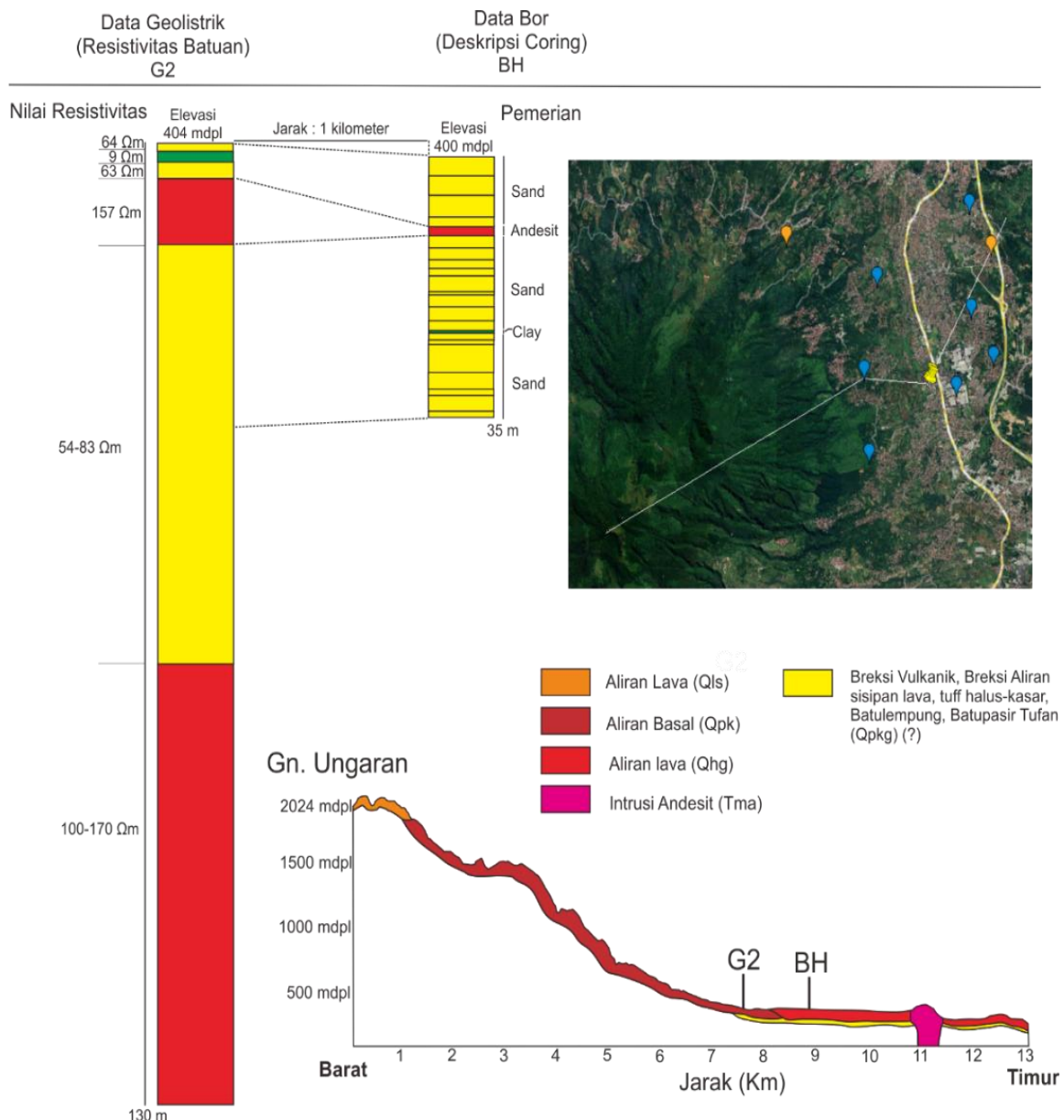
Secara umum, kondisi geologi daerah penelitian terbagi menjadi 3 jenis formasi batuan yaitu Formasi Endapan Sedimen, Formasi Batuan Gunung api, dan Formasi Batuan Intrusi (Thanden *et al.*, 1996), sedangkan geomorfologinya terdiri dari kelompok bentuk lahan vulkanik yang terdiri dari Kubah Lava Kepundan Kawah Ungaran Tua (VT1), Kubah Lava Lereng Atas Ungaran Tua (VT2), Kubah Lava Ungaran Tua (VT3), Medan Lava Lereng Atas Ungaran Tua (VT4), Aliran Lava Lereng Atas Ungaran Tua (VT5), Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6), Kubah Lava Kepundan Kawah Ungaran Muda (VM1), Kubah Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM2), Kubah Lava Ungaran Muda (VM3), Medan Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM4), Aliran Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM5), Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6); Bukit Intrusi Andesit (V1), Bukit Intrusi Basal (V2); kelompok bentuk lahan struktural yang terdiri dari Perbukitan Struktural Tersayat Kuat (S1), Perbukitan Struktural Tersayat Lemah (S2), Perbukitan Terisolasi (S3), Perbukitan Struktural-Vulkanik Tersayat Kuat (SV1), Perbukitan Struktural-Vulkanik Tersayat Lemah (SV2), Kubah Struktural-Vulkanik Tersayat Kuat (SV3), Dataran Struktural-Vulkanik (SV4); kelompok bentuk lahan denudasional terdiri dari Perbukitan Denudasional (D1), Lembah Denudasional (D2), dan bentuk lahan fluvial terdiri atas Dataran Alluvial (F1) yang merupakan hasil modifikasi endapan dari dataran Vulkanik Ungaran Muda, Medan Lava Vulkanik Ungaran Muda, Kerucut Vulkanik Ungaran Muda, Lereng Vulkanik Ungaran Tua, Kubah dan Medan Lava

Ungaran Tua, dan Perbukitan Vulkanik Tua (Marin *et al.*, 2015). Pengukuran geolistrik di wilayah kajian dilakukan sebanyak 9 titik pengukuran dengan satuan unit analisis adalah geomorfologi vulkanik di lereng bagian timur Gunung api Ungaran. Pengukuran ini difokuskan untuk memperoleh data resistivitas batuan yang berguna untuk analisis hidrostratigrafi sebagai penentuan keterdapatannya akuifer di lereng timur Gunung api Ungaran. Selanjutnya dilakukan pencocokan antara data resistivitas dan jenis batuan pada data log bor (Gambar 3).

Tabel 4 menunjukkan hubungan antara nilai resistivitas, jenis batuan, jenis lapisan, serta keberadaan air dan sifatnya dalam menyimpan air. Dari Tabel 4, terlihat bahwa lava basal dan andesit digolongkan sebagai akuifug, sedangkan endapan lahar diklasifikasikan sebagai akuifer yang merupakan bagian dari endapan aliran piroklastik. Sementara itu, tuf yang merupakan endapan piroklastik berupa jatuhnya yang memiliki material halus (abu) diklasifikasikan sebagai akuiklud. Klasifikasi tersebut berkaitan dengan sifat fisik dan hidrogeologi masing-masing material vulkanik. Lava basal dan andesit pada daerah penelitian diinterpretasikan sebagai akuifug karena umumnya dijumpai dalam kondisi relatif masif dan kompak, sehingga memiliki porositas primer serta permeabilitas yang rendah. Pada kondisi tersebut, kemampuan batuan untuk menyimpan maupun meloloskan air menjadi sangat terbatas. Meskipun lava dan andesit pada kondisi terkekalkan atau terlapukkan dapat membentuk porositas sekunder dan berperan sebagai akuifer, karakter tersebut tidak dominan pada hasil

interpretasi resistivitas di lokasi penelitian. Sebaliknya, endapan lahar yang didominasi material pasiran dan fragmen vulkanik relatif lepas memiliki ruang antarbutir yang lebih berkembang, sehingga porositas dan permeabilitasnya lebih tinggi serta mampu berfungsi sebagai lapisan pembawa air. Adapun tuf halus memiliki ukuran butir

yang kecil dan susunan material yang relatif rapat, sehingga air masih dapat tersimpan di dalam pori-porinya, tetapi pergerakannya sangat lambat karena permeabilitasnya rendah. Oleh karena itu, tuf dalam penelitian ini diklasifikasikan sebagai akuiklud.



Gambar (Figure) 3. Nilai resistivitas dan data log bor (Resistivity values and bore log data)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Tabel (Table) 4. Korelasi jenis litologi dan lapisan pembawa air (*Correlation between lithology type and water-bearing layer*)

No.	Nilai resistivitas (Ωm)	Jenis Batuan	Jenis lapisan penyimpan air tanah	Sifat
1.	> 100	Lava basal	Akuifug	Tidak dapat menyimpan dan meloloskan air
2.	> 100	Lava andesit	Akuifug	Tidak dapat menyimpan dan meloloskan air
3.	11-100	Endapan lahar (pasiran)	Akuifer	Dapat menyimpan dan meloloskan air
4.	<10	Tuf	Akuiklud	Dapat menyimpan air dalam jumlah terbatas, permeabilitas rendah

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)

Hidrostratigrafi

Berdasarkan hasil interpretasi geolistrik dan korelasinya dengan data log bor, setiap litologi di daerah penelitian menunjukkan karakter nilai resistivitas yang berbeda. Perbedaan tersebut tidak hanya mencerminkan jenis batuan, tetapi juga kondisi fisik batuan bawah permukaan yang mengontrol kemampuan menyimpan dan meloloskan air. Faktor-faktor seperti porositas, tingkat kejenuhan air, ukuran butir, derajat pelapukan, serta keberadaan rekahan turut memengaruhi besarnya nilai resistivitas. Material berbutir halus dan relatif jenuh air, seperti tuf, umumnya menunjukkan resistivitas rendah, sedangkan endapan lahar memiliki resistivitas menengah karena tersusun oleh material pasiran dan fragmen vulkanik dengan ruang antarbutir yang relatif berkembang. Sebaliknya, lava basal dan andesit yang relatif masif dan kompak cenderung memiliki resistivitas yang lebih tinggi karena porositas primer rendah. Variasi resistivitas pada litologi yang sama juga dapat terjadi akibat perbedaan tingkat pelapukan, intensitas rekahan, dan kandungan air di masing-masing lokasi. Oleh karena itu, interpretasi resistivitas dalam penelitian ini tidak dilakukan berdasarkan nilai resistivitas secara tunggal,

tetapi dikorelasikan dengan data log bor, kondisi geologi, dan geomorfologi untuk selanjutnya digunakan dalam penyusunan hidrostratigrafi daerah penelitian.

1. *Cross-section* titik G1-G5-G6

Titik G1, G5, dan G6 berada di wilayah dengan karakteristik geologi dan geomorfologi yang berbeda. Titik G1 terletak pada ketinggian 518 mdpl dengan geomorfologi Aliran Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM5) dan geologi berupa aliran lava. Struktur bawah permukaan terdiri dari dua lapisan: batuan andesit di bagian atas dengan resistivitas >250 Ωm dan batuan lava basal di bawahnya dengan resistivitas >100 Ωm . Titik G5, berada pada ketinggian 415 mdpl dalam zona geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), juga berada di satuan geologi aliran lava. Hasil geolistrik menunjukkan tiga jenis batuan: endapan lahar (15–41 Ωm) di lapisan atas, andesit (402 Ωm) setebal 10 m di bawahnya, dan tiga lapisan berurutan di bawah andesit berupa endapan lahar (74 Ωm), tuf (4 Ωm), serta endapan lahar (30 Ωm) di lapisan paling bawah.

Titik G6 berada pada ketinggian 454 mdpl dalam geomorfologi Kubah Struktural-Vulkanik Tersayat Kuat (SV6) dengan formasi geologi berupa breksi

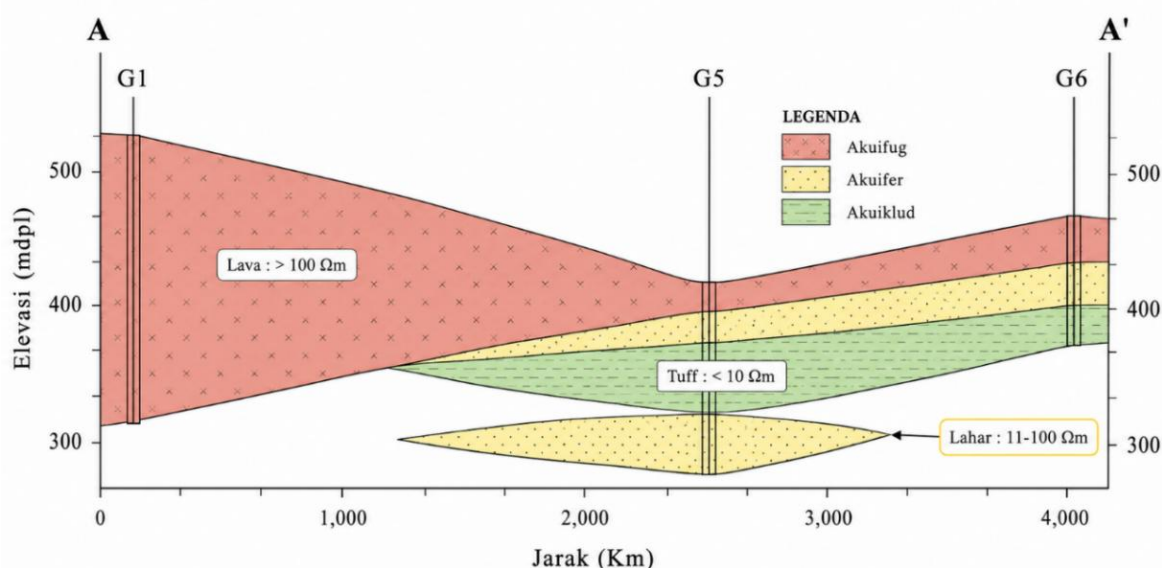
vulkanik, aliran lava, tuf, batupasir tufan, dan batu lempung. Nilai resistivitas di titik ini cukup bervariasi. Lapisan paling atas merupakan batuan lava dengan resistivitas 138 Ωm dan ketebalan sekitar 2 meter. Di bawahnya terdapat lapisan lahar pada kedalaman 2–9 meter, disusul lapisan andesit dengan resistivitas 271 Ωm . Lapisan lahar lain berada di bawah andesit dengan ketebalan ± 25 meter. Lapisan terdalam adalah tuf dengan resistivitas 3 Ωm yang mencapai kedalaman lebih dari 70 meter.

Penampang melintang G1–G5–G6 disajikan pada Gambar 4, lengkap dengan sebaran data spasialnya. Titik G1 terletak di lereng Gunung api Ungaran, sehingga menunjukkan aktivitas vulkanisme yang lebih intensif dibandingkan dengan titik G5 dan G6. Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa lapisan lava di titik G1 cukup tebal dan secara bertahap menipis ke arah G5 dan G6. Pada titik G5 dan G6 mulai dijumpai keberadaan lapisan endapan lahar yang berfungsi sebagai akuifer.

Lapisan ini berada di antara dua lapisan kedap, yaitu lava di bagian atas dan tuf di bagian bawah, sehingga berpotensi sebagai akuifer tertekan (*confined aquifer*). Menariknya, di bawah lapisan tuf tersebut juga ditemukan kembali lapisan lahar, yang kemungkinan merupakan akuifer kedua.

2. Cross-section titik G2-BH-G7

Titik G2 berada pada geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6) di ketinggian 404 mdpl. Formasi geologinya berupa aliran basal. Nilai resistivitas menunjukkan variasi material: 14–90 Ωm untuk endapan laharik, >100 Ωm untuk batuan lava (basal), dan 5–11 Ωm untuk endapan tuf. Lapisan tuf relatif tipis dibandingkan lapisan lahar dan lava, dengan lava sebagai lapisan dasar. Sementara itu, titik BH 1 (borehole) pada ketinggian 400 mdpl, termasuk dalam geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), dengan kondisi geologi berupa aliran lava.



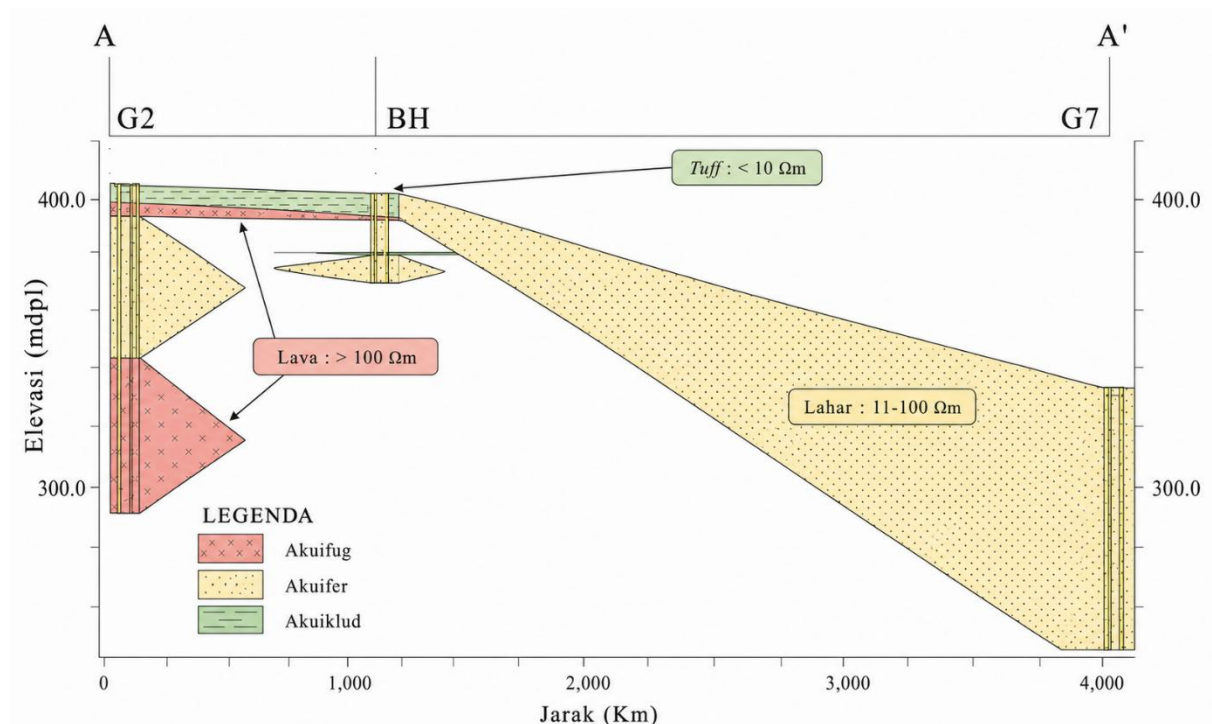
Gambar (Figure) 4. Cross Section Titik G1-G5-G6 (Cross-section of points G1-G5-G6)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Titik G7 berada pada ketinggian 319 mdpl, termasuk dalam geomorfologi Bukit Intrusi Andesit (V1) dengan kondisi geologi berupa batuan andesit. Hasil pengukuran resistivitas menunjukkan dominasi lapisan lahar dengan nilai 14–90 Ωm hingga kedalaman lebih dari 100 meter. Di bagian paling atas, terdapat lapisan tipis (<1 meter) dengan resistivitas tinggi sebesar 138 Ωm yang diinterpretasikan sebagai lava. Selain itu, pada kedalaman 2–4 meter ditemukan sisipan lapisan tuf dengan resistivitas sangat rendah, yakni 3 Ωm , di antara endapan lahar tersebut.

Titik geolistrik G2 dan G7 dikorelasikan dalam penampang melintang bersama titik bor BH, dengan G2 sebagai titik terdekat dan G7 sebagai titik terjauh dari Gunung api Ungaran. Sebagaimana yang disajikan

pada Gambar 5, lapisan atas didominasi oleh endapan lahar yang berperan sebagai akuifer bebas di wilayah ini. Di bawahnya terdapat lapisan lava (akuifug), yang teridentifikasi dari G2 ke BH dengan ketebalan yang tidak terlalu tebal, namun tidak tampak dalam korelasi dari BH ke G7. Secara hidrostratigrafi, potensi keberadaan akuifer tertekan pada penampang ini relatif kecil karena tidak ditemukan lapisan lahar yang diapit oleh dua lapisan kedap air. Sesuai dengan Irianto Tri Silohadi *et al.* (2025), sistem akuifer pada daerah stratovulkanik sangat dipengaruhi oleh variasi litologi yang kompleks, baik secara lateral maupun vertikal, sehingga diperlukan analisis lanjutan untuk memastikannya.



Gambar (Figure) 5. Cross Section Titik G2-BH-G7 (Cross-section of points G2-BH-G7)

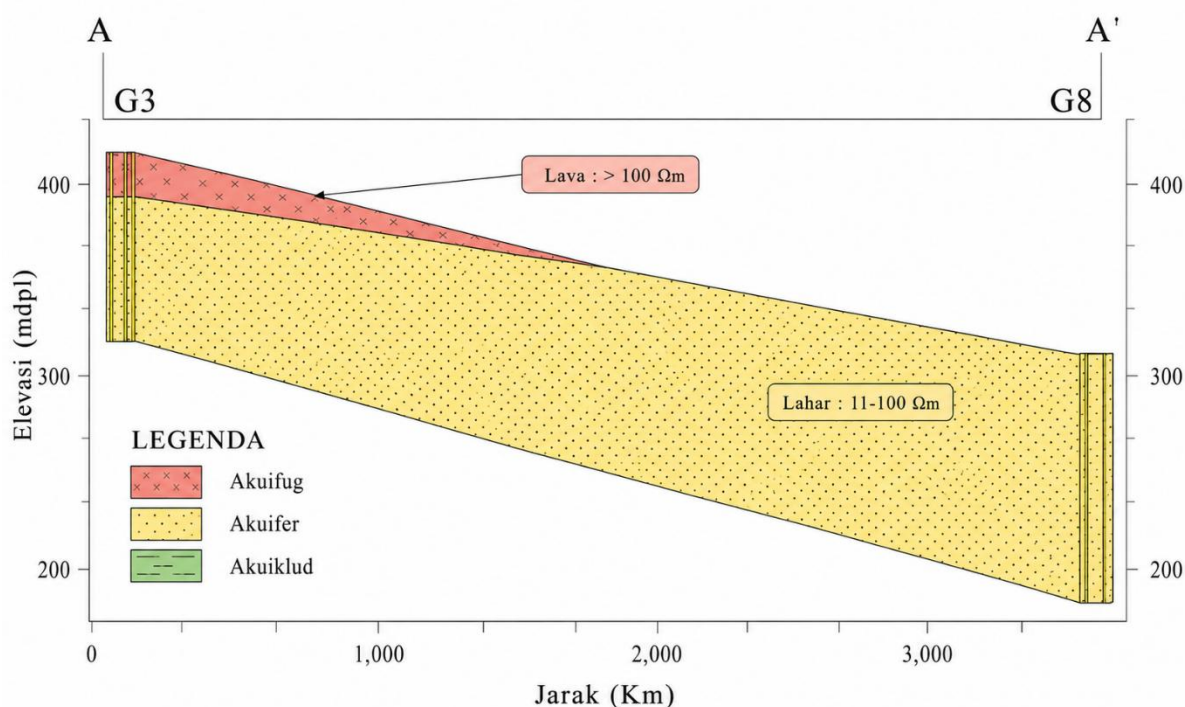
Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

3. Cross-section titik G3-G8

Titik G3 terletak di lereng Gunung api Ungaran pada elevasi 419 mdpl, berada pada satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6) dengan formasi geologi berupa aliran basal (lava). Interpretasi data geolistrik menunjukkan dua lapisan utama, yakni lapisan lava setebal ± 25 m dengan resistivitas $>100 \Omega m$ dan lapisan lahar di bawahnya dengan resistivitas $57-97 \Omega m$. Sementara itu, titik G8 berada di wilayah datar dengan elevasi 306 mdpl dalam satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), dengan dominasi endapan lahar. Resistivitas batuan berkisar antara $26-35 \Omega m$, menunjukkan homogenitas endapan lahar. Namun, dijumpai lapisan tuf pada kedalaman 2-4 m dengan resistivitas rendah sebesar $4 \Omega m$.

Kedalaman pengukuran di titik ini mencapai 140 m.

Korelasi antara titik geolistrik G3 dan G8 menunjukkan keberadaan dua satuan batuan utama, yakni lava dan lahar (Gambar 6). Pada titik G3, lapisan lava ditemukan di bagian atas, sedangkan pada titik G8, lapisan lava tidak teridentifikasi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa produk vulkanik Gunung api Ungaran tidak menjangkau wilayah titik G8. Perbedaan ini mencerminkan adanya dua sistem akuifer yang berbeda. Di titik G3, lapisan lahar sebagai akuifer berada di bawah lava, sehingga air tanah hanya dapat diakses dengan menembus lapisan lava terlebih dahulu. Sementara itu, ke arah titik G8, kemungkinan lapisan lava semakin menipis hingga tidak muncul, sehingga endapan lahar menjadi lebih terbuka dan berpotensi menjadi akuifer bebas (*unconfined aquifer*).



Gambar (Figure) 6. Cross-section Titik G3-G8 (Cross-section of points G3-G8)

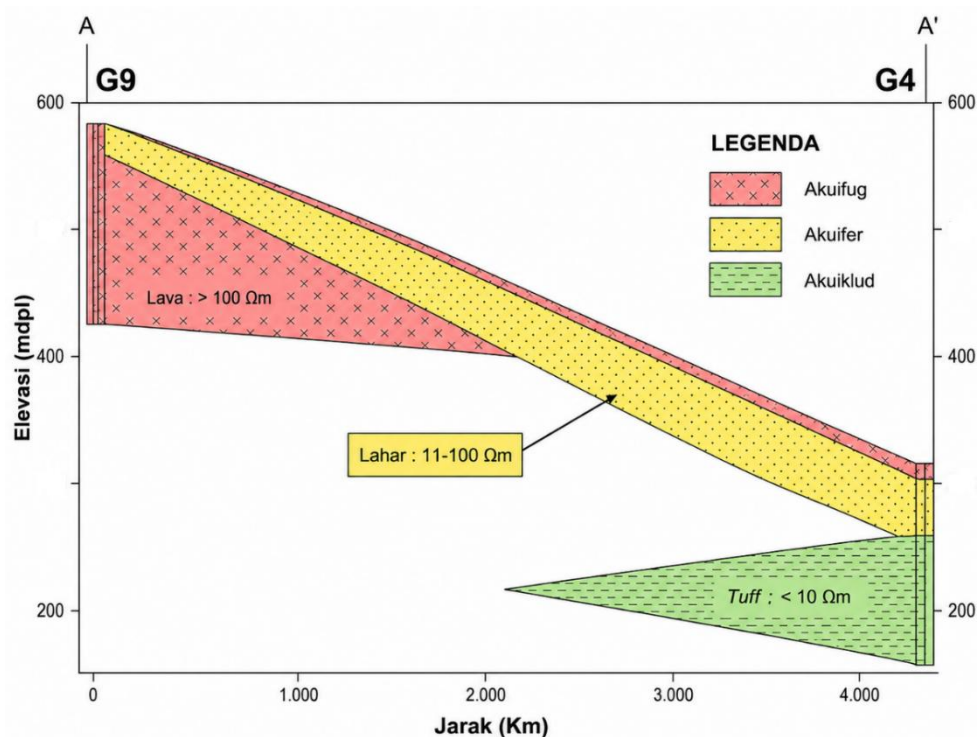
Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

4. Cross-section titik G4-G9

Titik G4 berada pada elevasi 320 mdpl dalam satuan geomorfologi Perbukitan Denudasional (D1) dan tersusun oleh batupasir tufan, konglomerat, breksi vulkanik, dan tufa. Hasil pengukuran geolistrik menunjukkan variasi resistivitas yang jelas, dengan lapisan lahar tipis di permukaan ($62 \Omega\text{m}$), diikuti oleh lava setebal $<10 \text{ m}$ ($>100 \Omega\text{m}$), kemudian lahar lebih tebal di bawahnya ($23\text{--}24 \Omega\text{m}$ pada kedalaman $20\text{--}45 \text{ m}$), serta lapisan tuf paling bawah yang sangat konduktif ($1\text{--}7 \Omega\text{m}$) hingga kedalaman 140 m . Sementara itu, titik G9 pada elevasi 548 mdpl, termasuk dalam satuan geomorfologi Medan Lava Lereng Atas Ungaran Tua (VT4) dan memiliki kondisi geologi berupa aliran basaltik.

Korelasi antara titik geolistrik G9 dan G4 menunjukkan keberadaan lapisan endapan

lahar yang dapat diamati pada Gambar 7. Titik G9, yang terletak pada elevasi lebih tinggi dan lebih dekat dengan Gunung api Ungaran, memiliki lapisan lava (sebagai akuifug) di bagian paling atas. Lapisan serupa juga ditemukan di titik G4, meskipun secara geomorfologis berada di wilayah yang lebih datar. Di bawah lapisan akuifug tersebut, tersusun lapisan lahar (piroklastik) yang berfungsi sebagai akuifer dan menjadi indikasi keberadaan air tanah di area ini. Namun, terdapat perbedaan jenis batuan pada lapisan yang lebih dalam: di bawah akuifer pada titik G9 terdapat kembali lapisan lava, sedangkan di titik G4 ditemukan lapisan tuf yang berperan sebagai akuiklud. Kedua jenis lapisan ini bersifat kedap air, sehingga akuifer yang terdapat dalam penampang antara titik G9 dan G4 kemungkinan besar merupakan akuifer tertekan (*confined aquifer*).



Gambar (Figure) 7. Cross-section titik G4-G9 (Cross-section of points G4-G9)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

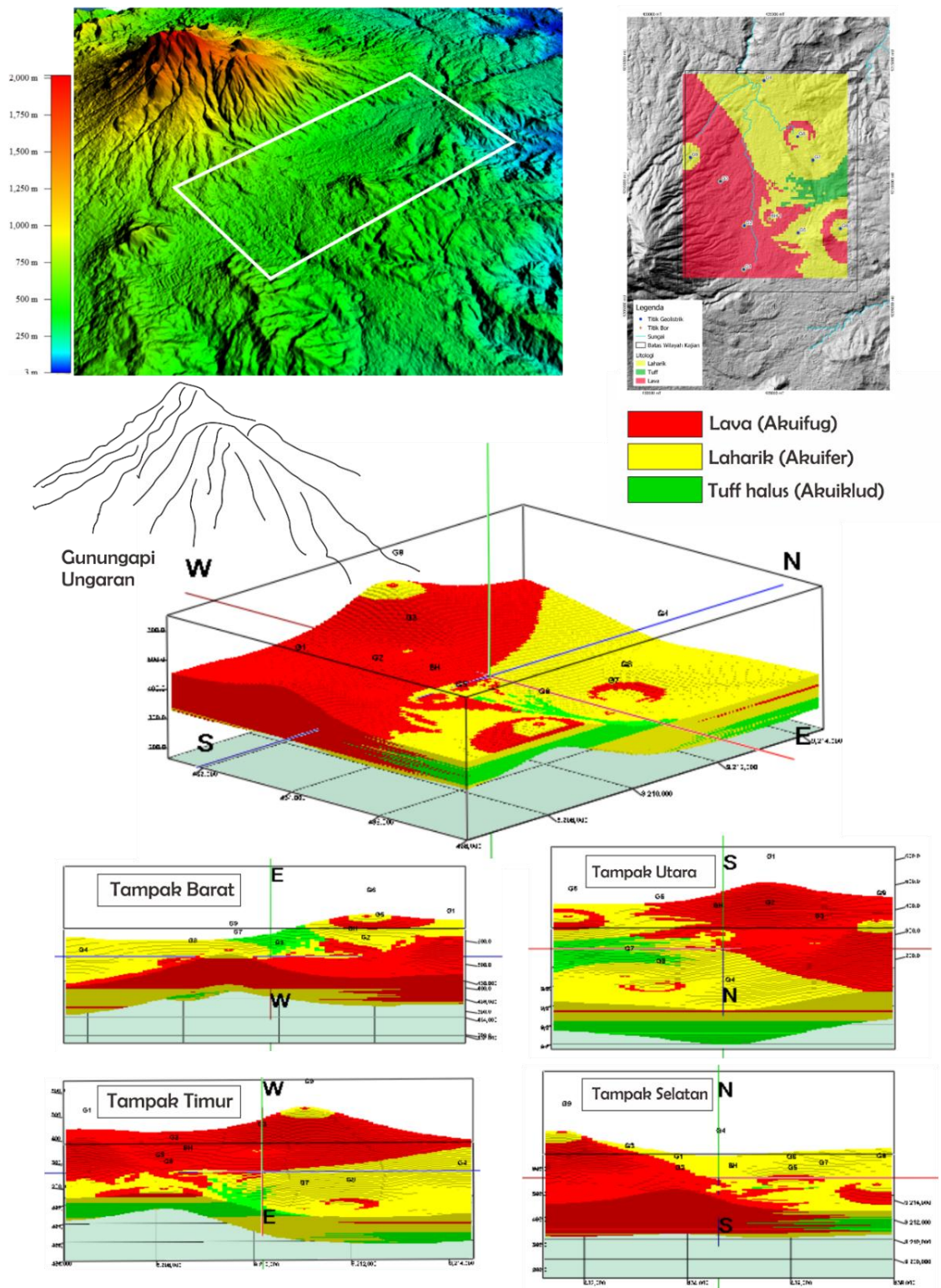
Selanjutnya, hasil model 3D hidrostratigrafi menunjukkan bahwa lapisan akuifer bebas yang dapat diidentifikasi adalah lapisan endapan lahar yang tersebar di bagian paling atas, seperti yang disajikan pada Gambar 8. Wilayah utara, timur, dan tengah, khususnya di lereng tengah, menunjukkan potensi akuifer bebas yang tinggi, ditandai pula oleh keberadaan sumur gali. Sumur gali umumnya dangkal, dengan kedalaman berkisar antara 5 hingga lebih dari 20 meter, dan dibangun untuk memanfaatkan akuifer tidak tertekan (akuifer bebas), sehingga mudah diakses oleh masyarakat lokal (Kifelew & Mesalie, 2021). Di bagian utara, lapisan lahar cukup tebal, namun terjepit antara lava dan tuf, sehingga memungkinkan terbentuknya akuifer tertekan. Sementara itu, zona timur juga didominasi lahar meskipun diselingi tuf dan lava. Sebaliknya, wilayah selatan dan barat didominasi oleh batuan lava (akuifug), sehingga potensi air tanah dangkal di daerah ini relatif rendah. Dengan demikian, zona yang paling berpotensi mengandung air tanah berada di wilayah utara, timur, dan tengah.

Analisis spasial terhadap data geologi, geomorfologi, hidrostratigrafi, dan aliran air tanah menunjukkan keterkaitan yang jelas berdasarkan hasil pengamatan lapangan (Tabel 5). Titik G1, yang berada pada satuan geomorfologi Aliran Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM5) dengan litologi lava, menunjukkan minimnya keberadaan sumur gali. Hal ini disebabkan oleh dominasi batuan lava di bawah permukaan yang berfungsi sebagai akuifug, sehingga potensi akuifer dangkal sangat

rendah. Berdasarkan pola aliran air tanah, wilayah ini berperan sebagai daerah imbuhan (*recharge area*) yang mengalir menuju satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Titik G2, G3, dan G4 berada pada satuan geomorfologi yang berbeda, yakni Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6) untuk G2 dan G3, serta Perbukitan Denudasional (D1) untuk G4. Ketiganya memiliki litologi berupa aliran basal hasil erupsi Gunung api Ungaran Tua. Data geolistrik menunjukkan bahwa lapisan lava mendominasi bagian atas, sementara di bawahnya terdapat lapisan endapan lahar yang berfungsi sebagai akuifer tertekan karena diapit oleh lapisan yang kedap air. Tidak ditemukannya sumur gali di wilayah ini mengindikasikan bahwa muka air tanah berada cukup dalam, sehingga mendukung fungsi kawasan ini sebagai daerah imbuhan (*recharge area*) menuju wilayah yang lebih rendah.

Sebaliknya, titik G5, BH1, dan G8 berada pada satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), sedangkan titik G7 berada pada Bukit Intrusi Andesit (V1), dengan litologi berupa produk intrusi andesit. Interpretasi geolistrik menunjukkan keberadaan lapisan lahar sebagai akuifer di bawah permukaan, yang memungkinkan banyak sumur gali di wilayah ini. Sistem aliran air tanah mengalir dari selatan ke utara melalui G5 dan BH1 menuju zona *discharge area*, serta dari timur (G7) menuju ke arah yang sama. Oleh karena itu, wilayah ini memiliki potensi air tanah dangkal yang baik, dengan kedalaman kurang dari 10 meter.



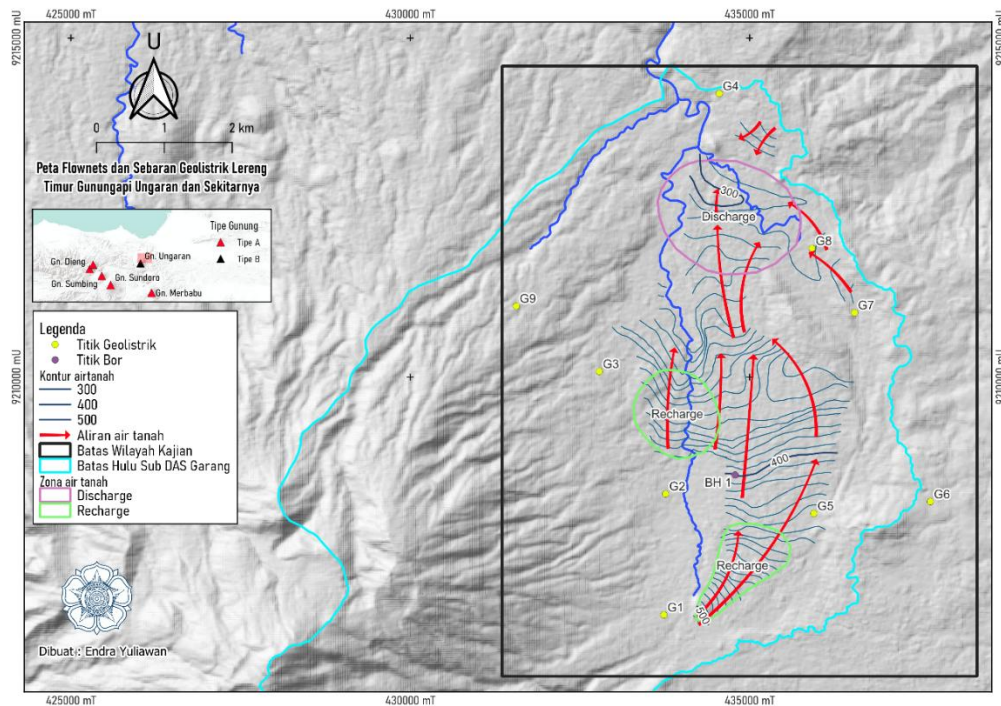
Gambar (Figure) 8. Model 3D hidrostratigrafi lereng timur Gunung api Ungaran (3D hydrostratigraphic model of the eastern slope of Ungaran Volcano)

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Tabel (Table) 5. Hubungan antara geologi, geomorfologi, hidrostratigrafi dan aliran air tanah (*The relationship between geology, geomorphology, hydrostratigraphy and groundwater flow*)

Titik Geolistrik	Geologi	Geomorfologi Vulkanik	Aliran Air tanah	Zona Air tanah	Hidrostratigrafi
G1	Aliran Lava	Aliran Lava Lereng Atas Ungaran Muda (VM5)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifug (tanpa akuifer)
G2	Aliran Basal	Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifer bebas di bagian atas, kemudian akuifug, akuifer tertekan (indikasi), dan paling bawah akuifug
G3	Aliran Basal	Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Tua (VT6)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifug bagian atas dan akuifer bagian bawah
G4	Batupasir Tufan, Konglomerat, Breksi Vulkanik, Tufa	Perbukitan Denudasional (D1)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifug, akuifer tertekan (indikasi), akuiklud
G5	Aliran Lava	Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6)	Sistem aliran air tanah dangkal	<i>Discharge Area</i>	Akuifer bebas, akuifug, akuifer tertekan (indikasi), akuiklud, akuifer
G6	Breksi Vulkanik, Aliran Lava, Tuf, Batupasir Tufan Dan Batu Lempung	Kubah Struktural-Vulkanik Tersayat Kuat (SV6)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifug, akuifer, akuifug, akuifer tertekan (indikasi), akuiklud
G7	Intrusi Andesit	Bukit Intrusi Andesit (V1)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifer bebas, akuiklud, akuifer
G8	Aliran Lava	Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6)	Sistem aliran air tanah dangkal	<i>Discharge Area</i>	Akuifer bebas, akuiklud, akuifer
G9	Aliran Basal	Medan Lava Lereng Atas Ungaran Tua (VT4)	Air tanah cenderung dalam	<i>Recharge Area</i>	Akuifer bebas, akuifug
BH	Aliran Lava	Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6)	Sistem aliran air tanah dangkal	<i>Recharge Area</i>	Akuifer bebas, akuifug, akuifer

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (*Data analysis 2025*)



Gambar (Figure) 9. *Flownets di Lereng Timur Gunung api Ungaran (Flownets on the eastern slope of Ungaran Volcano)*

Sumber (Source): Pengolahan data 2025 (Data analysis 2025)

Titik G4 yang berada di wilayah Perbukitan Denudasional (D1) dengan litologi batupasir tufan, breksi vulkanik, konglomerat, dan tufa menunjukkan aliran air tanah dari timur laut ke barat daya, yang kemungkinan mengarah ke sungai. Lapisan lahar pada kedalaman sekitar 10 meter berperan sebagai akuifer yang memfasilitasi pergerakan air tanah. Sementara itu, titik G6 yang terletak pada geomorfologi Kubah Struktural-Vulkanik Tersayat Kuat (SV6) tidak menunjukkan sistem aliran air tanah yang jelas, namun diduga merupakan daerah imbuhan (*recharge*) karena posisinya yang lebih tinggi. Data hidrostratigrafi menunjukkan adanya lapisan lahar bawah permukaan yang memungkinkan aliran air tanah ke wilayah yang lebih rendah.

Berdasarkan hasil identifikasi dan analisis hidrostratigrafi yang

menggabungkan data geolistrik, geologi, geomorfologi, serta sistem aliran air tanah, dapat disusun beberapa rekomendasi terkait pemanfaatan air tanah dari lapisan akuifer. Di wilayah hulu atau zona imbuhan (*recharge area*), keberadaan air tanah cenderung berada pada kedalaman yang relatif lebih dalam. Hal ini ditunjukkan oleh kondisi geologi di titik-titik G1, G2, G3, dan G9 yang didominasi oleh batuan lava, sehingga sumur gali sulit ditemukan. Oleh karena itu, eksploitasi air tanah di wilayah ini disarankan menggunakan sumur bor untuk menjangkau akuifer yang lebih dalam, sebagaimana ditunjukkan oleh data geolistrik pada titik G2 dan G3 yang mengidentifikasi lapisan akuifer pada kedalaman sekitar 30 meter. Akan tetapi, pengeboran sumur yang lebih dalam dengan sumur bor harus dilakukan dengan tepat agar tidak menimbulkan masalah

lebih lanjut, misalnya menimbulkan penurunan air tanah dalam jangka panjang (Kulkarni *et al.*, 2021).

Sebaliknya, pada wilayah yang relatif datar seperti satuan geomorfologi Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), ditemukan banyak sumur gali dengan kedalaman muka air tanah hanya sekitar 2–3 meter, yang menunjukkan keberadaan akuifer dangkal yang mudah diakses. Di wilayah ini, eksploitasi air tanah untuk kebutuhan rumah tangga tidak memerlukan sumur bor. Namun, pemanfaatan akuifer dangkal untuk kebutuhan dengan debit relatif besar, seperti kegiatan industri, perlu dikendalikan agar tidak menyebabkan penurunan muka air tanah yang melampaui batas aman. Mengacu pada Permen ESDM No. 31 Tahun 2018, kondisi akuifer tidak tertekan masih dikategorikan aman apabila penurunan muka freatik kurang dari 40% terhadap kondisi acuannya, sedangkan penurunan sebesar 40–60% dikategorikan rawan, >60–80% kritis, dan >80% rusak. Oleh karena itu, pemanfaatan akuifer dangkal sebaiknya dipertahankan dalam kondisi yang tidak menyebabkan penurunan muka air tanah melebihi batas tersebut. Penentuan debit maksimum yang aman pada lokasi penelitian belum dapat dihitung secara langsung dari data geolistrik, karena memerlukan informasi tambahan berupa parameter hidrolik akuifer, hasil uji pemompaan, besarnya imbuhan, dan/atau pemodelan air tanah. Untuk kebutuhan industri, pemanfaatan akuifer yang lebih dalam dapat dipertimbangkan dengan tetap didasarkan pada evaluasi debit aman dan pemantauan muka air tanah secara

berkala (Bonomi *et al.*, 2022). Sebagai alternatif, data geolistrik di titik G5 menunjukkan adanya akuifer yang lebih dalam pada kedalaman sekitar 80 meter, sehingga pembuatan sumur bor dalam dapat dipertimbangkan untuk keperluan industri tanpa mengganggu akuifer dangkal.

Hasil penelitian ini menunjukkan nilai resistivitas bawah permukaan di kawasan Gunung api Ungaran yang bervariasi antara <10 Ω m (lapisan tuf) hingga >100 Ω m (lava), serta 23–62 Ω m (endapan lahar). Pola ini mempertegas adanya stratifikasi hidrostratigrafi yang khas di lingkungan vulkanik, khususnya pada gunung api andesitik. Nilai resistivitas ini sejalan dengan temuan Silohadi *et al.* (2025) bahwa lapisan lahar di kawasan vulkanik Jawa Tengah menunjukkan nilai resistivitas antara 20–80 Ω m sebagai penunjuk akuifer produktif, sementara lava menunjukkan resistivitas >100 Ω m sebagai akuifug. Hal ini memperkuat interpretasi bahwa lava sering kali membentuk lapisan kedap air (akuifug), yang menghambat pergerakan air tanah dangkal.

Jika dibandingkan dengan kerangka konseptual dari Diamond *et al.* (2019) di Afrika Selatan dan Baud *et al.* (2024) dalam kajiannya terhadap akuifer andesitik global, hasil penelitian ini memperlihatkan konsistensi dalam pemahaman bahwa lingkungan gunung api tua memiliki kerumitan struktur hidrostratigrafi akibat proses stratifikasi dan lateralitas litologi. Baud *et al.* (2024) menekankan pentingnya membedakan zona proksimal dan medial dalam tubuh gunung api untuk mengidentifikasi potensi akuifer, yang juga tercermin dalam hasil spasial model 3D pada kawasan Ungaran, yakni sebaran

lahar sebagai akuifer dominan di zona tengah dan timur, serta keterbatasan air tanah di zona barat-selatan yang didominasi lava.

Selain itu, hasil riset ini juga memberikan kontribusi nyata terhadap pendekatan geolistrik dalam menentukan sistem akuifer di daerah vulkanik tropis. Di saat banyak studi sebelumnya masih bersifat deskriptif atau mengandalkan sumur uji, penelitian ini mempromosikan pendekatan integratif melalui pemetaan resistivitas 3D, korelasi dengan geomorfologi, serta analisis arah aliran air tanah. Studi seperti Phanjaya *et al.* (2022) dan Hanif *et al.* (2025) lebih menekankan aspek sosial dan distribusi air bersih, tetapi belum membahas struktur akuifer secara mendalam berbasis resistivitas. Dengan demikian, pendekatan penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pengelolaan air tanah berbasis data geofisika dan pemodelan hidrostratigrafi, yang sangat relevan untuk wilayah pegunungan vulkanik lainnya di Indonesia dan kawasan sejenis. Secara keseluruhan, sumbangan riset ini tidak hanya memperkaya basis data (*database*) resistivitas batuan vulkanik lokal, tetapi juga mendemonstrasikan bagaimana integrasi geolistrik, geomorfologi, dan geologi dapat diterapkan untuk pemetaan zona akuifer dangkal dan tertekan di lingkungan gunung api tropis.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem akuifer di lereng timur Gunung api Ungaran terdiri atas akuifer bebas dan akuifer tertekan yang terbentuk akibat variasi litologi vulkanik di bawah

permukaan. Berdasarkan hasil integrasi data geolistrik, geologi, geomorfologi, dan aliran air tanah, lapisan tuf dengan resistivitas $<10 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai akuiklud, endapan lahar dengan resistivitas sekitar $11\text{--}100 \Omega\text{m}$ sebagai akuifer, sedangkan lava basal dan andesit dengan resistivitas $>100 \Omega\text{m}$ cenderung berperan sebagai akuifug. Akuifer bebas tersebar terutama pada wilayah tengah dan timur, khususnya pada satuan Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), sedangkan indikasi akuifer tertekan ditemukan pada zona timur laut ketika lapisan lahar terjepit di antara lapisan lava dan tuf. Pada beberapa lokasi, akuifer teridentifikasi pada kedalaman sekitar 30 m, sedangkan akuifer yang lebih dalam ditemukan hingga sekitar 80 m. Wilayah barat dan selatan relatif didominasi oleh lava sehingga potensi air tanah dangkal lebih terbatas, sedangkan wilayah tengah dan timur memiliki potensi air tanah yang lebih baik.

Berdasarkan zonasi hidrostratigrafi, pemanfaatan air tanah perlu dibedakan berdasarkan kedalaman dan karakter akuifernya. Akuifer dangkal yang berkembang terutama di wilayah tengah dan timur, khususnya pada satuan Aliran Piroklastik Lereng Tengah Ungaran Muda (VM6), sebaiknya diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan domestik masyarakat. Sementara itu, kebutuhan air dengan debit yang lebih besar, termasuk untuk kegiatan industri, sebaiknya diarahkan pada akuifer yang lebih dalam apabila tersedia, dengan tetap didasarkan pada hasil uji pemompaan, evaluasi debit aman, serta pemantauan muka air tanah secara berkala. Pendekatan ini diperlukan

untuk mengurangi tekanan terhadap akuifer dangkal dan menjaga keberlanjutan sumber daya air tanah di lereng timur Gunung api Ungaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Mandiri Dosen Fakultas Geografi UGM sesuai dengan Surat keputusan Dekan No. 109/UN1/GE/KPT/2025. Terima kasih secara khusus diucapkan kepada Pemerintah Kabupaten Semarang yang telah memberikan izin penelitian sehingga pengambilan data lapangan dapat berjalan lancar.

KONTRIBUSI

Endra Yuliawan sebagai peneliti utama menyusun konsep penelitian, merancang metodologi, melakukan analisis dan interpretasi data, peninjauan pustaka, penyusunan draf awal naskah, serta revisi akhir naskah. Sonna Diwijaya berkontribusi dalam akuisisi data lapangan dan mendukung pengolahan data hasil survei. Hilmy Ahmad berkontribusi dalam akuisisi data lapangan serta mendukung proses dokumentasi dan pengumpulan data penelitian. Tjahyo Nugroho Adji memberikan supervisi penelitian, memberikan arahan metodologis dan ilmiah, serta memperoleh dan mengelola pendanaan penelitian. Ahmad Cahyadi memberikan konsultasi dan masukan konseptual, khususnya terkait aspek geologi, serta berkontribusi dalam penyempurnaan interpretasi dan substansi ilmiah naskah. Seluruh penulis telah menelaah dan menyetujui naskah akhir sebelum dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Admin. (2025, June 5). *RockWorks—RockWare*.
<https://www.rockware.com/product/rockworks/>
- Arifianto, I., Wintolo, D., & Wibowo, J. P. (2017). *Resistivity Survey for Groundwater Exploration in Tiron Village, Kediri, East Jawa*.
- Atsamari, A. A., & Pigawati, B. (2024). Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Perkembangan Kota Ungaran. *Jurnal Pengembangan Kota*, 12(1), 13–22.
<https://doi.org/10.14710/jpk.12.1.13-22>
- Awadh, S. M., Al-Mimar, H., & Yaseen, Z. M. (2021). Groundwater availability and water demand sustainability over the upper mega aquifers of Arabian Peninsula and west region of Iraq. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1007/s10668-019-00578-z>
- Baud, B., Lachassagne, P., Dumont, M., Toulhier, A., Hendrayana, H., Fadillah, A., & Dorfliger, N. (2024). Review: Andesitic aquifers—hydrogeological conceptual models and insights relevant to applied hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 32(5), 1259–1286.
<https://doi.org/10.1007/s10040-024-02784-0>
- Bennett, G., Van Camp, M., Shemsanga, C., Kervyn, M., & Walraevens, K. (2022). Delineation of the aquifer structure and estimation of hydraulic properties on the flanks of Mount Meru, Northern Tanzania. *Journal of African Earth*

- Sciences*, 196, 104673.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104673>
- Betterle, A., & Bellin, A. (2024). Morphological and Hydrogeological Controls of Groundwater Flows and Water Age Distribution in Mountain Aquifers and Streams. *Water Resources Research*, 60(11), e2024WR037407. <https://doi.org/10.1029/2024WR037407>
- Binley, A. (2015). 11.08—Tools and Techniques: Electrical Methods. In G. Schubert (Ed.), *Treatise on Geophysics (Second Edition)* (Second Edition, pp. 233–259). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00192-5>
- Bonomi, T., Sartirana, D., Toscani, L., Stefania, G. A., Zanotti, C., Rotiroti, M., Redaelli, A., & Fumagalli, L. (2022). Modeling groundwater/surface-water interactions and their effects on hydraulic barriers, the case of the industrial area of Mantua (Italy). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 11(2), 43–55. <https://doi.org/10.7343/as-2022-569>
- Christensen, C. W., Hayashi, M., & Bentley, L. R. (2020). Hydrogeological characterization of an alpine aquifer system in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1871–1890. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02153-7>
- Darmawan, I. G. B., Haerudin, N., & Setiawan, A. (2021). *Groundwater exploration using integrated geophysics method in hard rock terrains in Mount Betung Western Bandar Lampung, Indonesia*. 10(1), 10–18.
- Diamond, R. E., Dippenaar, M. A., & Adams, S. (2019). South African Hydrostratigraphy: A conceptual framework. *South African Journal of Geology*, 122(3), 269–282. <https://doi.org/10.25131/sajg.122.0027>
- Fabien-Ouellet, G., & Gloaguen, E. (2014). Geostatistical Integration of Geophysical Measurements for Hydrogeological Investigations. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2014*, 211–211. <https://doi.org/10.4133/SAGEEP.27-082>
- GreyMatters Global. (2023, February 8). *Soil resistivity Testing Method -The Schlumberger Array*. Greymatters. <https://greymattersglobal.com/soil-resistivity-testing-methods-schlumberger-array/>
- Hanif, A., Mirzahi, S., Zakiri, J. A., Loodin, N., Nadeem, G. F., & Rahmani, S. A. B. (2025). Maneuvers of Informal Settlement Communities in Access to Drinking Water: Insights from Herat City, Afghanistan. *ACS ES&T Water*, 5(1), 81–90. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00632>
- Irianto Tri Silohadi, S., Bahagiarti Kusumayudha, S., Prasetyadi, C., Yatini, & Agus Karmadi, M. (2025). The interconnection of the Volcanic Aquifer Layers Influences the Interaction of Hydrogeological and Hydrology Systems on Cisadane River. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1451(1), 012017.

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1451/1/012017>
- Jamilah. (2021, Agustus). Protes Kekurangan Air, FKP-PDAM Datangi Sumber Kalidoh Ungaran. *Jatengpos.co.id*.
<https://jatengpos.co.id/utama/2021/08/13/protes-kekurangan-air-fkp-pdam-datangi-sumber-kalidoh-ungaran/>
- Kifelew, M. S., & Mesalie, R. A. (2021). The optimistic implication of hand-dug wells in water resources development and handling in Ethiopia, a developing economy, such as in Guna Tana landscape. *Sustainable Water Resources Management*, 7(6), 91.
<https://doi.org/10.1007/s40899-021-00567-z>
- Kulkarni, T., Gassmann, M., Kulkarni, C. M., Khed, V., & Buerkert, A. (2021). Deep Drilling for Groundwater in Bengaluru, India: A Case Study on the City's Over-Exploited Hard-Rock Aquifer System. *Sustainability*, 13(21), 12149.
<https://doi.org/10.3390/su132112149>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (2nd ed). Cambridge University Press.
- Manyoe, I. N., & Hutagalung, R. (2020). Subsurface Shallow Modelling Based on Resistivity Data in The Hot Springs Area of Libungo Geothermal, Gorontalo. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 5(2), 87–93.
<https://doi.org/10.25299/jgeet.2020.5.2.5094>
- Marin, J., Harijoko, A., Pramumijoyo, S., & Humaida, H. (2015). Studi Geomorfologi Gunung Api dan Petrogenesis Batuan untuk Memahami Evolusi Vulkanotektonik pada Gunung Ungaran, Provinsi Jawa Tengah. *Proceeding Seminar Nasional Kebumian Ke-8*, 447–458
- Nouradine, H., Schamper, C., Valdes, D., Moussa, I., Ramel, D., & Plagnes, V. (2024). Integrating geological, hydrogeological and geophysical data to identify groundwater resources in granitic basement areas (Guéra Massif, Chad). *Hydrogeology Journal*, 32(3), 759–784.
<https://doi.org/10.1007/s10040-024-02766-2>
- Nugraha, G. U., Nur, A. A., Sudrajat, Y., Arifin, J., Bakti, H., Lubis, R. F., & Rulyadi, A. D. (2023). Sub-surface configuration in the northern part of Lembang groundwater basin recharge area. *Applied Water Science*, 13(10), 204.
<https://doi.org/10.1007/s13201-023-02004-2>
- Park, S. G., Shin, S. W., Lee, D. K., Kim, C. R., & Son, J. S. (2016, September 4). *Relationship between Electrical Resistivity and Physical Properties of Rocks*. Near Surface Geoscience 2016 - First Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, Barcelona, Spain.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602101>
- Patra, H. P., Adhikari, S. K., & Kunar, S. (2016). *Groundwater Prospecting and Management*. Springer Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-1148-1>
- Phanjaya, H., Parnadi, W. W., & Santoso, D. (2022). Electrical resistivity survey for groundwater investigation in Padalarang, West Java. *IOP Conference Series: Earth*

- and Environmental Science*, 1031(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012006>
- Procel, S., Núñez, G., Puebla, R., Hirata, R., Manciat, C., & Mendoza, B. (2023). Conceptual model of groundwater flow in a volcanic-sedimentary aquifer system of the Andean region of Chimborazo, Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 131, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104641>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics, Second Edition*. Cambridge University Press.
- Thanden, R. E., Sumadirja, H., Richards, P. W., Sutisna, K., & Amin, T. C. (1996). *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Jawa Skala 1:100.000* (Second) [Map]. Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Wang, L., Jia, B., Xie, Z., Wang, B., Liu, S., Li, R., Liu, B., Wang, Y., & Chen, S. (2022). Impact of groundwater extraction on hydrological process over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Journal of Hydrology*, 609, 127689. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127689>
- Zuhdi, M., Syamsuddin, S., Sukrisna, B., Ardianto, T., & Habiburrohman, A. W. (2023). Fresh Water Exploration in Gunung Tunak, Lombok Island, Using Wenner Electrodes Configuration. *Journal of Science and Science Education*, 4(1), 33–38. <https://doi.org/10.29303/jossed.v4i1.2075>