

Bimbingan Teknis tentang Identifikasi Air Tanah untuk Pasokan Air Berkelanjutan di PSDKU Lumajang, Jawa Timur, Indonesia

Gregorius Aryoko Gautama^{1*}, Dandung Novianto¹, Trias Rahardianto²,
Marjono², Diah Lydianingtias³, Nabila Ayu Sabrina³

¹ Mining Technology, Civil Engineering Department, Politeknik Negeri Malang, Indonesia, ² Civil Engineering Department, Politeknik Negeri Malang, Indonesia, ³ Civil Engineering Department, PSDKU Lumajang, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

*Corresponding author

E-mail: aryokog@polinema.ac.id*

Article History:

Received: October, 2026

Revised: October, 2026

Accepted: October, 2026

Abstract: PSDKU Lumajang adalah kampus pendidikan seluas 5,3 hektare yang terletak di Desa Jogoyudan, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. Kampus ini mengandalkan lima sumur bor untuk pasokan airnya; namun, semua sumur bor mengalami kekeringan selama musim kemarau (April–Oktober), sehingga mahasiswa dan staf tidak memiliki air bersih yang memadai. Kegiatan pelayanan masyarakat ini bertujuan mengidentifikasi zona potensial air tanah menggunakan metode resistivitas geoelektrik (konfigurasi Schlumberger dan Wenner) di tujuh jalur survei (L1–L7) dengan kedalaman identifikasi hingga 200 meter. Hasil interpretasi tujuh penampang resistivitas menunjukkan zona akuifer prospektif dengan nilai resistivitas 25–60 Ωm , yang menunjukkan adanya lapisan breksi vulkanik yang terlapuk dan tufa pasir jenuh air. Zona dengan potensi air tanah tertinggi diidentifikasi pada Jalur L2 pada titik pengukuran 4–7, pada kedalaman sekitar 95–180 meter, dan pada Jalur L3 pada titik 3–6, pada kedalaman sekitar 100–160 meter. Zona-zona ini diinterpretasikan sebagai lapisan akuifer produktif utama. Hasil survei memberikan dasar ilmiah untuk merencanakan titik pengeboran sumur baru guna memastikan pasokan air bersih yang berkelanjutan di PSDKU Lumajang.

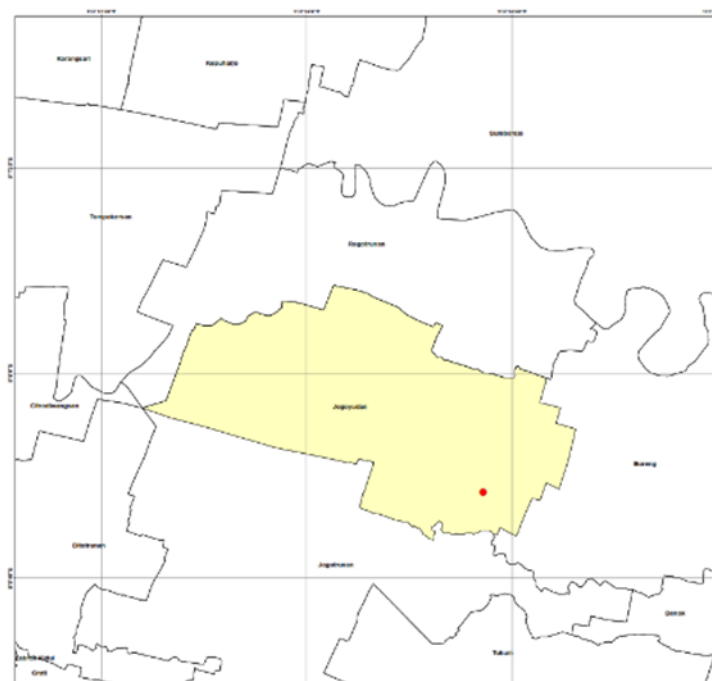
Keywords:

Air Tanah, Identifikasi Akuifer, Pengabdian kepada Masyarakat, Pasokan Air Berkelanjutan, Jawa Timur, Indonesia

Pendahuluan

Akses ke air bersih dan andal merupakan persyaratan fundamental bagi institusi pendidikan, terutama yang berada di wilayah yang rentan terhadap kekeringan musiman. PSDKU Lumajang (Program Studi di Luar Kampus Utama – Politeknik Negeri Malang) adalah kawasan pendidikan di luar kampus yang

didirikan pada tahun 2021 di Desa Jogoyudan, Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur, Indonesia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kampus ini mencakup luas 5,3 hektare dan saat ini melayani sekitar 300 mahasiswa yang terdaftar dalam empat program studi. Air bersih diperoleh dari lima sumur bor yang tersebar di seluruh area kampus. Namun, selama musim kemarau — yang biasanya berlangsung dari April hingga Oktober — kelima sumur bor tersebut mengalami kekosongan, sehingga menyebabkan kekurangan air kritis yang mengganggu aktivitas akademik dan operasional.

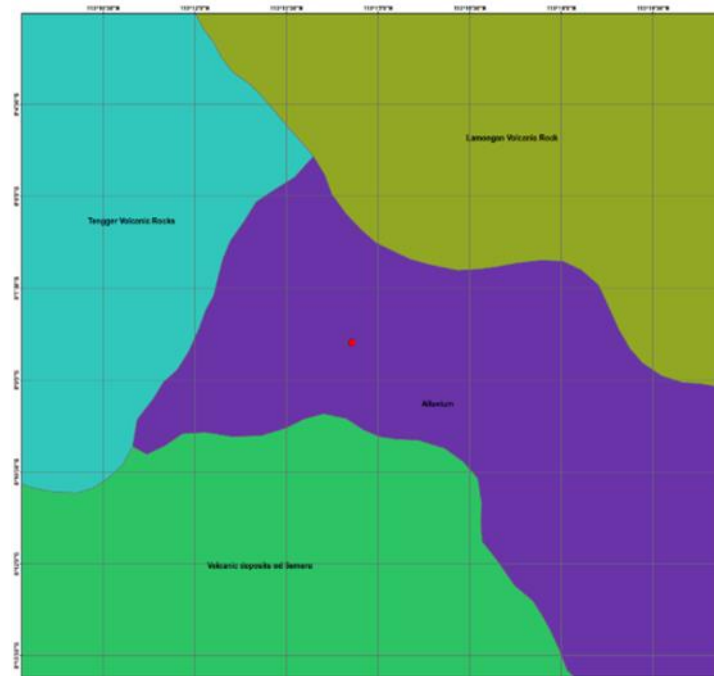


Gambar 1. Peta Administrasi

Wilayah Lumajang secara geologi berada di bawah pengaruh kompleks vulkanik utama, termasuk Gunung Semeru, Gunung Tengger, dan Gunung Lamongan. Geologi lokal didominasi oleh endapan aluvial yang berasal dari material vulkanik seperti pasir, kerikil, lumpur, dan lempung yang diendapkan melalui proses fluvial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Lapisan aluvial ini umumnya berfungsi sebagai akuifer produktif tanpa tertutup (akuifer bebas); namun, kapasitas penyimpanannya sangat bergantung pada pola curah hujan musiman dan zona pengisian ulang yang terkait dengan dataran tinggi vulkanik di sekitarnya.

Penelitian sebelumnya di Jawa Timur telah mendokumentasikan bahwa kondisi kekeringan semakin intensif akibat perubahan iklim, dengan musim kemarau menjadi lebih lama dan memengaruhi area pertanian dan peri-urban yang lebih luas

(Kirana et al.,2023). Studi eksplorasi air tanah di lingkungan geologi serupa telah menunjukkan bahwa metode geofisika—khususnya teknik resistivitas geoelektrik—merupakan alat efektif untuk memetakan variasi litologi bawah permukaan dan mengidentifikasi zona akuifer produktif (Prabowo et al.,2022).

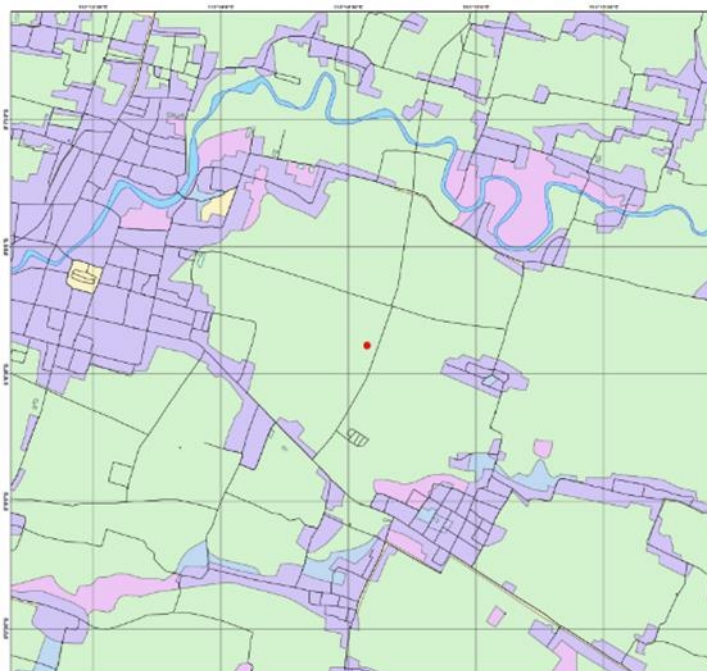


Gambar 2. Peta Geologi

Kegiatan pelayanan masyarakat ini dilakukan oleh tim dari Politeknik Negeri Malang bekerja sama dengan PSDKU Lumajang. Tujuan utamanya adalah melakukan survei identifikasi air tanah secara sistematis menggunakan metode resistivitas geoelektrik di tujuh jalur survei di dalam area kampus, guna menentukan lokasi optimal dan kedalaman yang direkomendasikan untuk pengeboran bor baru. Makalah ini menyajikan metodologi, hasil, dan interpretasi hidrogeologi survei, serta menawarkan rekomendasi yang dapat menjadi dasar ilmiah pengembangan infrastruktur di kampus.

Gambar 3. menunjukkan peta topografi dan lokasi pengumpulan data untuk kegiatan pelayanan masyarakat di Desa Jogoyudan, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur, dengan sistem koordinat GCS WGS 1984. Peta ini berisi informasi spasial dalam bentuk titik pengumpulan data, jaringan jalan, sungai, kawasan permukiman, perumahan, dan zona deformasi. Titik pengumpulan data ditunjukkan dengan simbol lingkaran merah dan terletak di area yang relatif terbuka di antara beberapa kelompok permukiman. Informasi ini memberikan gambaran tentang posisi geografis

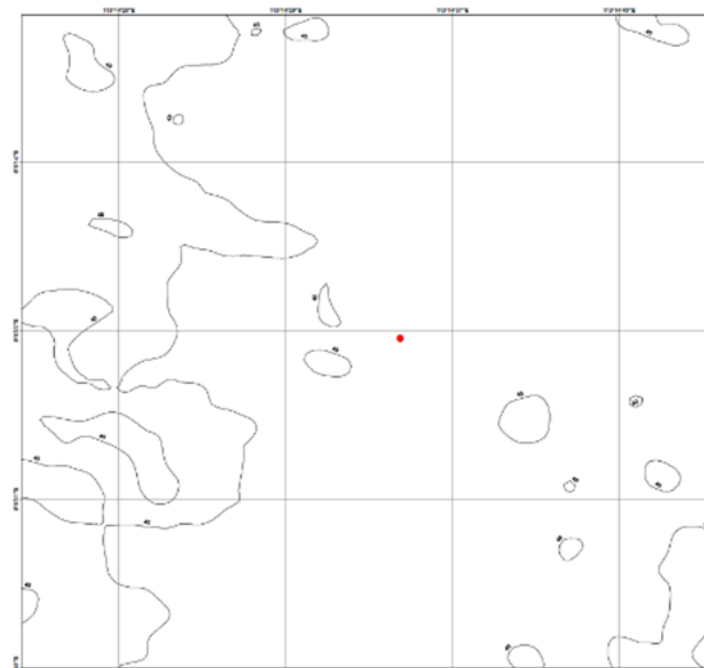
lokasi penelitian dan hubungannya dengan kondisi penggunaan lahan serta elemen lingkungan sekitarnya. Secara spasial, area permukiman cenderung terkonsentrasi di utara, barat, dan selatan, sementara area di sekitar titik pengumpulan data relatif didominasi oleh zona terbuka. Keberadaan jaringan sungai dan jalan di sekitar lokasi merupakan parameter penting dalam memahami karakteristik lingkungan dan aksesibilitas regional. Peta ini kemudian dapat digunakan sebagai baseline spasial untuk mengintegrasikan data lapangan dengan informasi kondisi topografi, geologi, hidrogeologi, dan lingkungan, sehingga mendukung analisis berbasis data dan perencanaan wilayah di Desa Jogoyudan, Kabupaten Lumajang



Gambar 3. Peta Topografi

Peta kontur pada Gambar 4 menunjukkan variasi elevasi di area sekitar PSDKU Polinema Lumajang, terutama di Desa Jogoyudan, dengan interval kontur dalam kisaran 40–50 meter di atas permukaan laut. Secara geomorfologis, area dengan kontur yang sempit cenderung memiliki lereng yang lebih curam, sehingga menjadi zona limpasan tinggi, sementara area dengan kontur yang menunjukkan topografi yang relatif datar berpotensi menjadi zona akumulasi dan infiltrasi air permukaan. Lokasi pengumpulan data yang ditandai dengan simbol titik merah berada di area transisi antara kontur 45 m dan 40 m, sehingga dapat diasumsikan berada di area datar hingga miring yang memungkinkan akumulasi air permukaan lebih besar dibandingkan dengan area sekitarnya yang lebih tinggi. Hubungan topografi dengan ketersediaan air tanah sangat dekat, mengingat area dengan elevasi rendah umumnya

berfungsi sebagai zona pembuangan atau keluaran air tanah, sementara area dengan elevasi relatif tinggi berfungsi lebih sebagai zona pengisian ulang. Dalam peta ini, keberadaan beberapa cekungan kecil (kontur tertutup) di sekitar lokasi studi dapat menjadi indikator mikrocekungan yang berpotensi menampung limpasan permukaan sekaligus memfasilitasi infiltrasi ke akuifer dangkal. Selain itu, posisi lokasi pengumpulan data yang berdekatan dengan kontur dataran rendah meningkatkan peluang menemukan tingkat air tanah yang relatif dangkal, sehingga relevan untuk kebutuhan penelitian layanan masyarakat terkait pemanfaatan sumber daya air tanah di wilayah Lumajang.



Gambar 4. Peta Kontur

Air tanah merupakan komponen penting dari sistem hidrologi dan memainkan peran strategis dalam mendukung pasokan air domestik, pertanian, dan komunitas. Ketersediaannya dikendalikan oleh interaksi antara presipitasi, infiltrasi, karakteristik geologi, geometri akuifer, aliran air tanah, dan pengambilan air tanah. Peningkatan populasi, perubahan penggunaan lahan, variabilitas iklim, dan tekanan ekstraksi dapat memengaruhi pengisian ulang dan penyimpanan air tanah, menjadikan identifikasi dan pengelolaan air tanah sebagai komponen penting dalam perencanaan sumber daya air yang berkelanjutan. Tinjauan terbaru menekankan bahwa pengelolaan air tanah berkelanjutan tidak hanya membutuhkan identifikasi kejadian air tanah, tetapi juga mempertimbangkan pengisian ulang, penyimpanan, ekstraksi, pemantauan, dan perlindungan sumber daya jangka panjang (Khan & Baba, 2026)

Tempatkan air tanah sebagai komponen penting dalam sistem air global sekaligus sumber daya yang menghadapi tekanan akibat eksploitasi dan perubahan lingkungan. Keberlanjutan air tanah tidak hanya berkaitan dengan jumlah air yang tersedia, tetapi juga dengan hubungan antara sistem hidrogeologi, ekosistem, aktivitas manusia, tata kelola, dan kebutuhan komunitas. Perspektif ini menjadi dasar untuk identifikasi air tanah yang perlu diikuti dengan strategi pemanfaatan yang mempertimbangkan keberlanjutan jangka panjang (Gleeson et al.,2020). Pengelolaan air tanah yang berkelanjutan membutuhkan integrasi antara pemodelan, analisis ketidakpastian, dan partisipasi pemangku kepentingan. Studi ini juga menekankan kesenjangan komunikasi antara ilmuwan, pembuat kebijakan, dan komunitas. Temuan ini relevan untuk kegiatan panduan teknis karena hasil survei geofisika perlu diterjemahkan menjadi informasi yang dapat dipahami dan dimanfaatkan oleh komunitas (Elshall et al.,2020). Konsep modern pengelolaan air memandang air tanah dan air permukaan sebagai sistem yang saling terhubung. Perubahan iklim dan intervensi manusia dapat memengaruhi penyimpanan air serta pola ketersediaannya. Oleh karena itu, identifikasi air tanah untuk penyediaan air bersih perlu mempertimbangkan kondisi hidrologi dan proses pengisian ulang selain menentukan lokasi akuifer (Scanlon et al.,2023). Pemanfaatan air tanah dapat dianggap berkelanjutan jika perubahan pengisian ulang, pembuangan, tingkat air tanah, dan kualitas dapat mencapai kondisi yang relatif stabil dalam skala waktu manusia. Pendekatan ini menunjukkan pentingnya memahami sumber dan mekanisme pengisian ulang kapan zona air tanah akan digunakan sebagai sumber air komunitas (Cuthbert et al.,2023). Air tanah secara langsung terkait dengan pencapaian SDG 6 tentang air bersih dan sanitasi serta SDG 13 tentang tindakan terhadap perubahan iklim. Ancaman terhadap air tanah meliputi kontaminasi, eksploitasi berlebihan, dan perubahan iklim. Dengan demikian, identifikasi sumber air tanah merupakan langkah awal penting dalam perencanaan pasokan air yang berkelanjutan (Nandi et al.,2024).

Resistivitas listrik adalah parameter geofisika yang umum digunakan untuk eksplorasi air tanah karena sifat listrik bawah permukaan sensitif terhadap litologi, porositas, saturasi air, konduktivitas cairan pori-pori, dan kandungan tanah liat. Survei resistivitas listrik dapat menghasilkan citra variasi pada material bawah permukaan dan mengidentifikasi zona dengan tingkat kejenuhan air yang berbeda. Vertical Electrical Sounding (VES) memberikan informasi terutama tentang perubahan vertikal dalam resistivitas tampak, sedangkan Electrical Resistivity Tomography (ERT) menyediakan representasi dua dimensi atau tiga dimensi dari

variasi resistivitas (Ogunkoya et al.,2025). Chen menjelaskan bahwa ERT dapat digunakan untuk menyelidiki distribusi air bawah permukaan dan perubahan penyimpanan air. Metode ini memberikan informasi spasial mengenai kondisi bawah permukaan yang dapat digunakan untuk memahami hubungan antara air, tanah, dan batuan (Chen et al.,2022). ERT dapat digunakan untuk mengkarakterisasi dan memantau sistem air tanah, termasuk akuifer yang terletak pada kedalaman tertentu. Studi ini juga menunjukkan bahwa desain elektroda dan kondisi lingkungan bawah permukaan dapat memengaruhi kualitas interpretasi ERT (Rockhold et al.,2020). Resistivitas listrik dapat digunakan untuk meningkatkan karakterisasi heterogenitas akuifer dan bahkan memiliki hubungan dengan parameter hidrolik tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa data resistivitas dapat memberikan informasi lebih dari sekadar indikasi keberadaan air ketika dikalibrasi dengan data hidrogeologi (Vogelgesang et al.,2020).

Hubungan antara interpretasi geofisika dan pemilihan target pengeboran telah dibuktikan dalam beberapa investigasi air tanah, misalnya dengan menerapkan metode resistivitas listrik di Amanuban Selatan, Indonesia, untuk mengidentifikasi zona pembawa air tanah dan menentukan lokasi sumur dalam. Zona akuifer yang diinterpretasikan terjadi pada kedalaman sekitar 50–150 m, meskipun akuifer menunjukkan geometri yang terbatas dan tidak kontinu. Studi ini menunjukkan bahwa interpretasi resistivitas dapat menjadi dasar untuk memilih lokasi pengeboran, sekaligus menunjukkan bahwa kontinuitas spasial akuifer yang diinterpretasikan perlu dipertimbangkan sebelum pengeboran (Supandi,2020). Untuk pengembangan pasokan air komunitas, pemilihan lokasi sumur harus mengikuti proses pengambilan keputusan berurutan. Tahap pertama melibatkan penetapan lingkungan geologi dan hidrogeologi; tahap kedua melibatkan pengambilan dan pemrosesan data geofisika; tahap ketiga mengidentifikasi dan mengurutkan anomali bawah permukaan berdasarkan potensi air tanah yang tampak; dan tahap keempat memilih target pengeboran bersyarat berdasarkan integrasi bukti geofisika, geologi, topografi, dan hidrogeologi. Tinjauan terbaru menekankan bahwa metode geofisika dapat membantu mengoptimalkan lokasi sumur, mengurangi biaya eksplorasi, serta mengidentifikasi kedalaman, ketebalan, retakan, dan potensi jalur aliran air tanah akuifer. Namun demikian, survei geofisika tetap merupakan metode tidak langsung dan tidak dapat menjamin secara independen pembuangan sumur, kualitas air tanah, atau keberlanjutan akuifer jangka panjang (Bennett,2024). Perubahan iklim dapat memengaruhi kuantitas dan kualitas air tanah melalui perubahan pengisian ulang, sehingga estimasi pengisian ulang menjadi komponen penting dalam pengelolaan air

tanah (Riwaz et al.,2022). Pengelolaan pengisian ulang membutuhkan pendekatan multidisipliner yang mempertimbangkan sumber air, zona tak jenuh, dampak terhadap air tanah, perubahan iklim, dan aspek sosial-ekonomi. Oleh karena itu, identifikasi akuifer harus diikuti dengan strategi untuk melindungi area pengisian ulang dan mengendalikan pemanfaatan air tanah (Levintal et al.,2022). Studi terbaru tentang *solusi berbasis alam* menunjukkan bahwa pendekatan berbasis proses alami dapat digunakan untuk meningkatkan atau mempertahankan pengisian ulang air tanah. Hal ini relevan untuk program pengabdian kepada masyarakat karena identifikasi sumber air tanah dapat menjadi tahap awal untuk kemudian mengembangkan strategi konservasi seperti perlindungan daerah tangkapan air dan pengelolaan limpasan (Kebede et al.,2024).

Metode

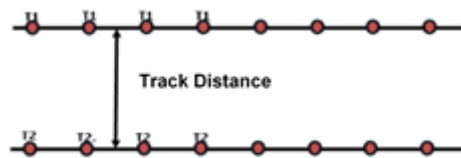
Pengumpulan data lapangan dilakukan pada bulan Juni, sesuai dengan periode yang ditandai dengan curah hujan yang relatif rendah. Waktu survei dianggap penting karena variasi musiman dalam curah hujan dapat memengaruhi kondisi air tanah dan jumlah air yang tersedia dalam sistem akuifer. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa tingkat air tanah sangat sensitif terhadap kondisi kering yang berkepanjangan, sementara variasi curah hujan dan suhu dapat berkontribusi pada perubahan penyimpanan air tanah. Penelitian yang dilakukan di Indonesia juga menunjukkan perbedaan ketersediaan air tanah antara musim hujan dan kemarau, dengan penurunan tingkat air tanah yang terkait dengan penurunan presipitasi dan perubahan dinamika pembuangan air tanah (Sejati et al.,2024). Survei lapangan dirancang dengan menetapkan titik pengukuran dan mendefinisikan lintasan survei antara lokasi yang telah ditentukan. Susunan spasial lintasan pengukuran dimaksudkan untuk menyediakan informasi bawah permukaan yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi variasi zona pembawa air tanah dan menilai kontinuitas spasialnya. Informasi semacam ini penting untuk memahami hubungan antara pengisian ulang air tanah, abstraksi, dan kondisi akuifer, terutama dalam mengembangkan strategi yang tepat untuk pemanfaatan air tanah dan menjaga keseimbangan sumber daya air tanah (Le Cointe et al.,2020).

Konfigurasi survei spasial terdiri dari titik pengukuran yang ditempatkan 1 m di sepanjang setiap garis survei, dengan jarak antar lintasan antara 5 hingga 8 m (Gambar 5 dan 6). Konfigurasi ini dirancang untuk memberikan cakupan spasial rinci dari area yang diselidiki dan menangkap variasi lateral pada sifat listrik bawah

permukaan yang relevan untuk identifikasi air tanah. Interval titik yang relatif pendek di sepanjang setiap lintasan mendukung deteksi variasi bawah permukaan yang terlokalisasi, sedangkan jarak antargaris memberikan cakupan lateral yang lebih luas pada area survei. Konfigurasi spasial yang dipilih kemudian digunakan sebagai dasar untuk memproses dan menafsirkan data bawah permukaan. Pengambilan sampel spasial yang memadai penting dalam investigasi air tanah karena representasi zona pengisian ulang, formasi pembawa air tanah, dan hubungan hidroliknya bergantung pada distribusi dan kepadatan titik pengamatan. Pertimbangan ini sangat relevan untuk pengaturan aluvial, di mana ekstraksi air tanah dapat memengaruhi interaksi air tanah dan permukaan air dan proses hidrologi terkait (de Graaf et al.,2024)



Gambar 5. Jarak Pengambilan Data



Gambar 6. Jarak Setiap Lintasan

Terdapat tujuh jalur pengumpulan data: L1, L2, L3, L4, L5, L6, dan L7. Jarak antara lintasan bervariasi antara 5 dan 8 meter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Jarak antara titik-titik dalam jalur adalah satu meter.

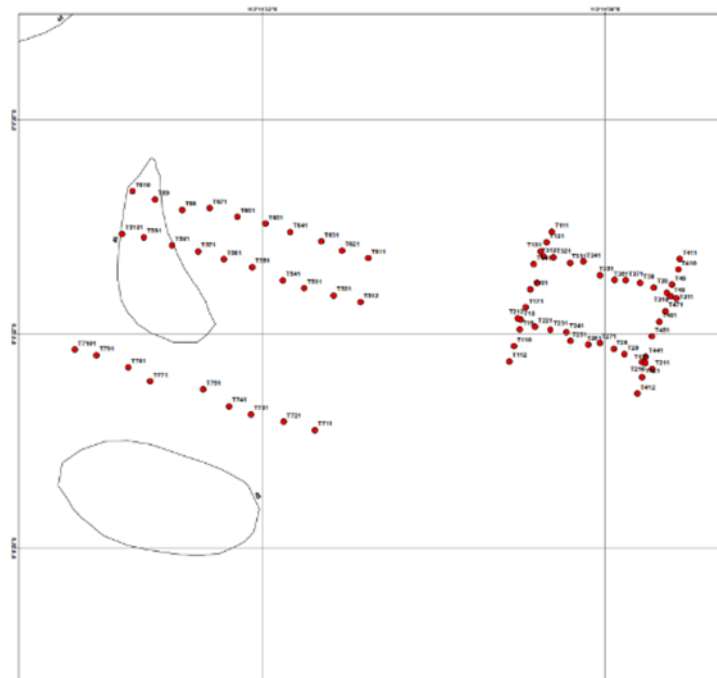


Gambar 7. Lintasan Pengambilan Data

Tabel 1. Data Capture Trajectory

Lintasan	Panjang (m)	Warna
----------	-------------	-------

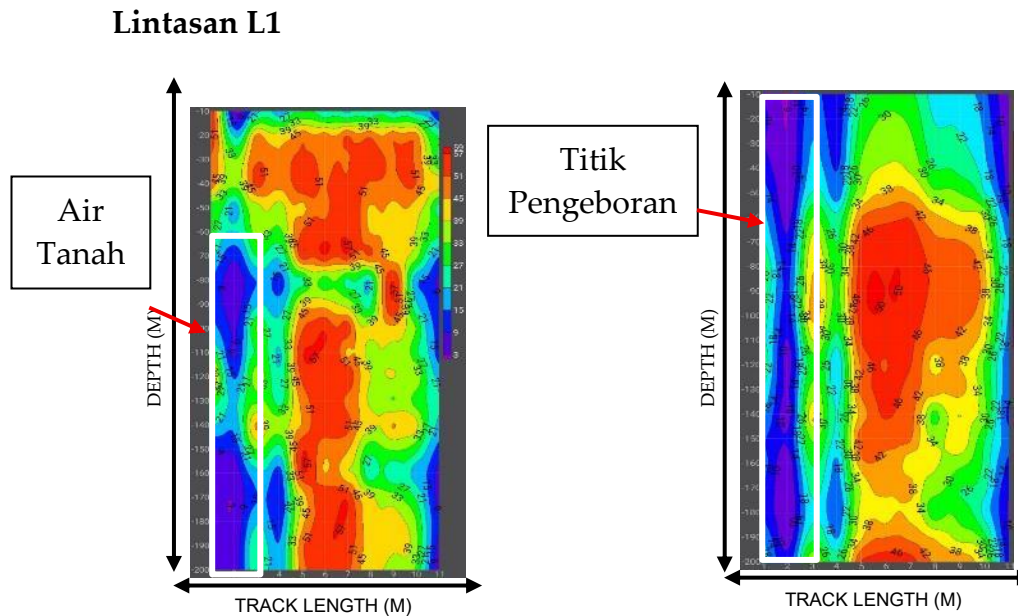
L1	50	Red
L2	50	White
L3	50	Dark Blue
L4	50	Yellow
L5	88	Brown
L6	88	Cyan
L7	88	Purple



Gambar 7. Peta Lintasan

Hasil

Pengolahan data menggunakan perangkat lunak dengan konfigurasi 0 dan 2. Konfigurasi 0 digunakan untuk menampilkan sumber air tanah dan konfigurasi 2 untuk menampilkan titik bor.



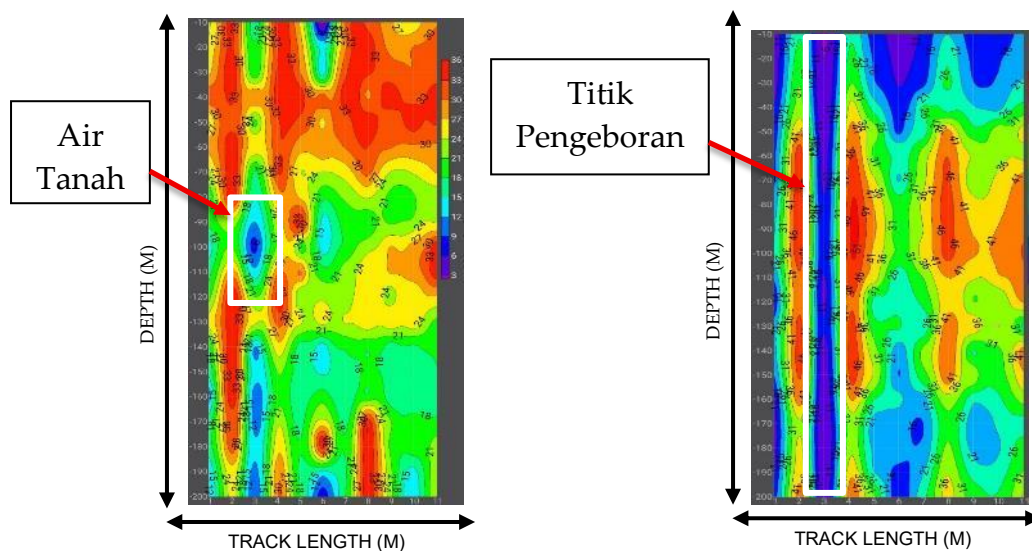
Gambar 8. Lintasan L1 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Interpretasi resistivitas pada Gambar 8 menunjukkan bahwa terdapat variasi nilai yang dapat dikaitkan dengan perbedaan litologi vulkanik Formasi Gunung Berapi Tengger. Zona dengan nilai resistivitas rendah hingga sedang ($3\text{--}30\ \Omega\cdot\text{m}$) umumnya diinterpretasikan sebagai endapan tuf yang terculi, pasir tukaan, dan material aluvial yang jenuh oleh air. Secara hidrogeologis, lapisan ini berfungsi sebagai akuifer utama dengan produktivitas tinggi hingga sedang, tergantung pada ketebalan dan kontinuitas lateralnya. Kehadiran lapisan yang lebih resistif di atas atau di bawah zona konduktif berpotensi bertindak sebagai lapisan akuiklus, sehingga memungkinkan terbentuknya akuifer yang tertekan dan dapat memberikan pembuangan yang lebih stabil. Di sisi lain, nilai resistivitas tinggi ($>45\ \Omega\cdot\text{m}$) menunjukkan adanya batuan beku padat seperti lava andesit-basal atau intrusi yang cenderung tidak tembus air. Lapisan ini berfungsi sebagai akuiklid atau akuitard, sehingga tidak direkomendasikan sebagai target pengeboran utama kecuali ditemukan retakan signifikan. Dengan demikian, pemetaan resistivitas tidak hanya menggambarkan variasi litologis, tetapi juga menyediakan dasar hidrogeologi penting untuk menentukan zona potensi air tanah. Interpretasi ini masih perlu diverifikasi melalui pengeboran eksplorasi, penebangan sumur, dan pengujian pemompaan untuk memastikan produktivitas dan kualitas air tanah yang dihasilkan.

Lintasan L2

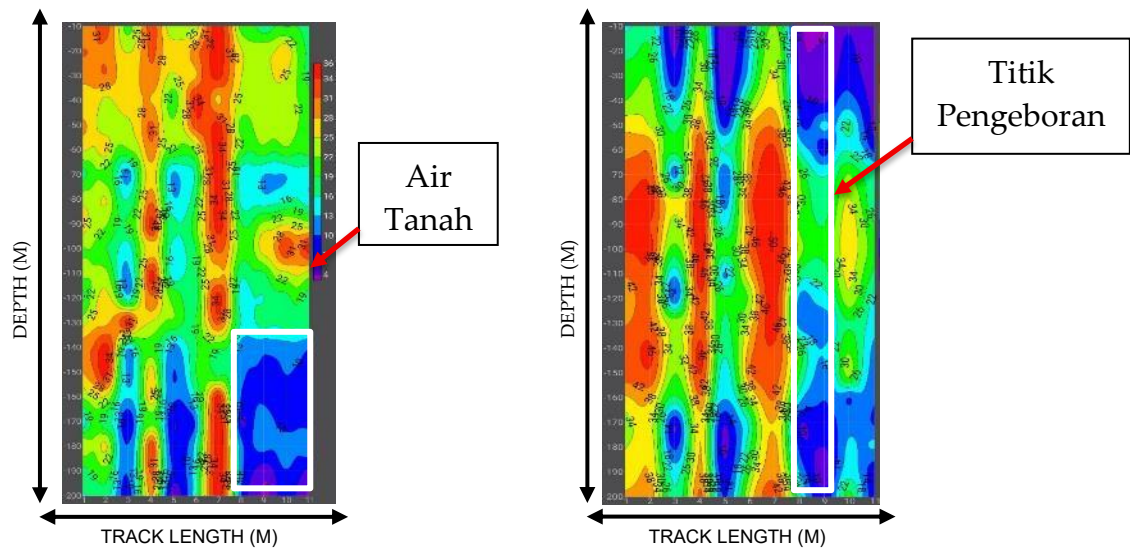
Interpretasi penampang pada hasil resistivitas Gambar 9 menunjukkan variasi nilai dari rendah ($3\text{--}9\ \Omega\cdot\text{m}$) hingga tinggi ($>33\ \Omega\cdot\text{m}$), yang secara geologis dapat

dikaitkan dengan litologi vulkanik dan endapan aluvial. Zona resistivitas rendah ($3\text{--}15\ \Omega\cdot\text{m}$) umumnya mewakili lapisan permeabel tanah liat jenuh air, tuf yang lapuk, atau pasir aluvial. Keberadaan zona-zona ini, yang terlihat pada kedalaman sekitar $80\text{--}120\text{ m}$ dan $160\text{--}190\text{ m}$, menunjukkan potensi sebagai akuifer produktif. Sementara itu, nilai resistivitas menengah ($18\text{--}27\ \Omega\cdot\text{m}$) diinterpretasikan sebagai breksi tuff atau tufaan kompak dengan permeabilitas sedang, yang memungkinkan penyimpanan air tanah meskipun produktivitas terbatas. Zona dengan resistivitas tinggi ($27\text{--}33\ \Omega\cdot\text{m}$) hingga sangat tinggi ($>33\ \Omega\cdot\text{m}$) didominasi oleh batuan vulkanik padat seperti breksi vulkanik dan lava andesit-basal, yang berfungsi sebagai lapisan kedap air (akuiklusif). Secara hidrogeologi, lapisan-lapisan ini cenderung mengendalikan aliran air tanah dengan menahan pergerakan vertikal, sehingga air tanah terkonsentrasi di zona permeabel di sekitarnya. Oleh karena itu, konfigurasi penampang ini menunjukkan sistem akuifer yang dikendalikan oleh lapisan dan retakan batuan vulkanik.



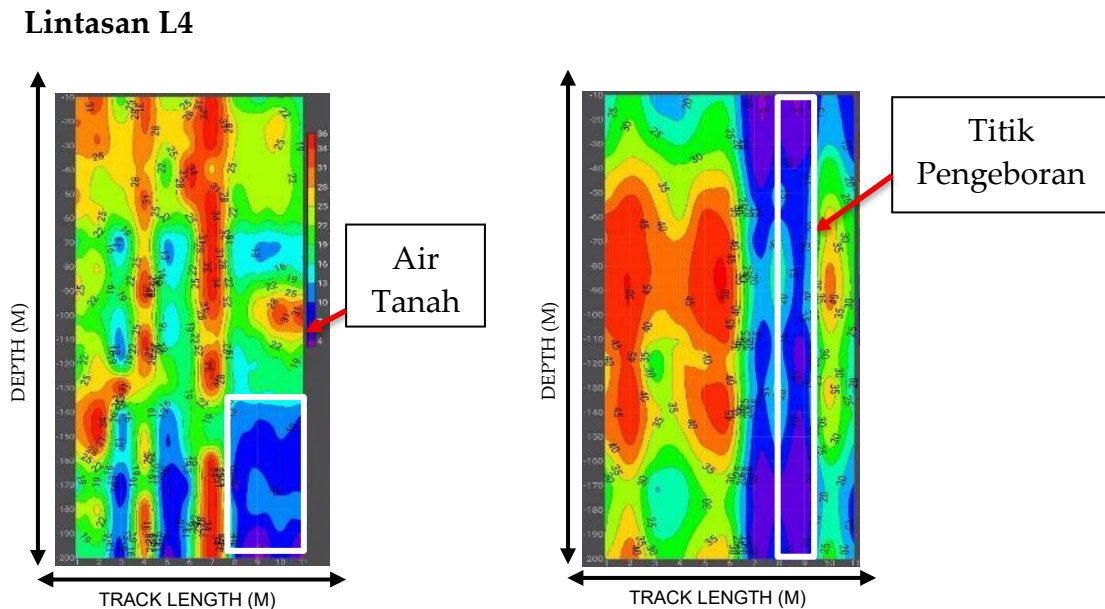
Gambar 9. Lintasan L2 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Lintasan L3



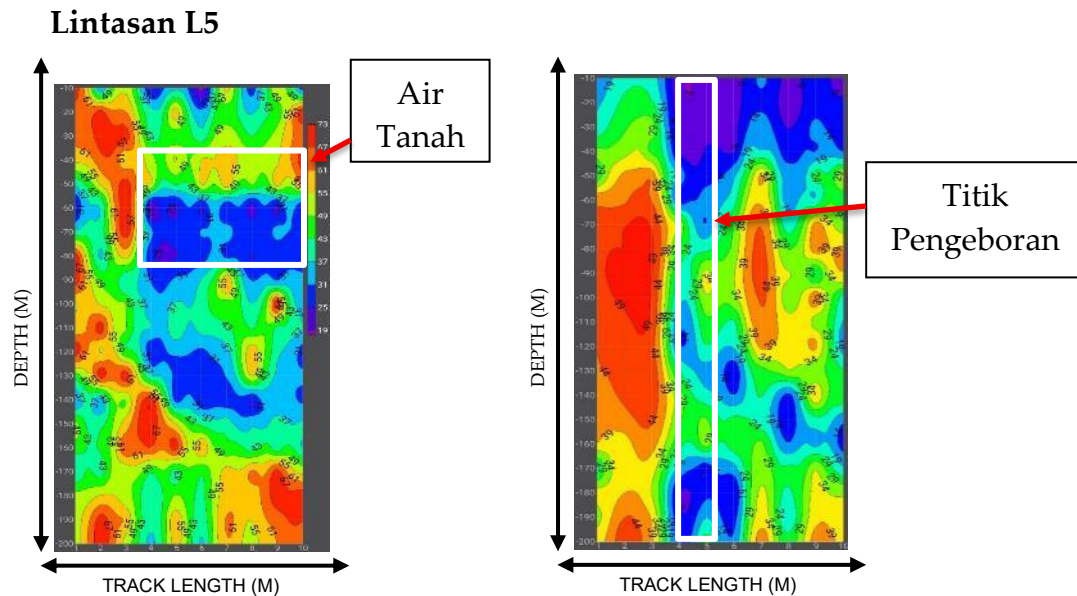
Gambar 10. Lintasan L3 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Penampang resistivitas pada Gambar 10 menunjukkan bahwa variasi nilai yang tersebar antara $<10 \Omega\cdot\text{m}$ dan $>34 \Omega\cdot\text{m}$ menunjukkan heterogenitas litologi bawah permukaan. Zona dengan resistivitas rendah ($10\text{--}16 \Omega\cdot\text{m}$) yang diidentifikasi pada kedalaman sedang hingga dalam mewakili tanah liat jenuh air atau material tuff yang terlapuk dengan kandungan air tinggi, tetapi kurang permeabel, sehingga berfungsi sebagai akuifer. Sementara itu, zona dengan resistivitas sedang ($17\text{--}22 \Omega\cdot\text{m}$) yang muncul pada beberapa kedalaman menunjukkan keberadaan pasir tuffaan atau breksi yang terculi, yang secara geologis lebih berpori dan berfungsi sebagai akuifer produktif. Distribusi nilai resistivitas ini menunjukkan hubungan antara variasi material vulkanik dan peran hidrogeologisnya dalam penyimpanan air tanah. Di sisi lain, zona dengan resistivitas sedang–tinggi ($23\text{--}33 \Omega\cdot\text{m}$) yang tersebar di beberapa bagian lintasan menunjukkan litologi dalam bentuk breksi vulkanik kompak hingga lava andesit, yang memiliki permeabilitas rendah dan cenderung merupakan akuifer lokal. Nilai resistivitas sangat tinggi ($>34 \Omega\cdot\text{m}$) menunjukkan batuan beku masif seperti basal atau intrusi, yang berfungsi sebagai dasar kedap air dan menjadi batas bawah sistem akuifer. Dengan demikian, penampang resistivitas ini tidak hanya menggambarkan distribusi litologi vulkanik di bawah permukaan, tetapi juga mengonfirmasi keberadaan zona prospektif air tanah yang dikendalikan oleh variasi litologi dan laju pelapukan batuan vulkanik.



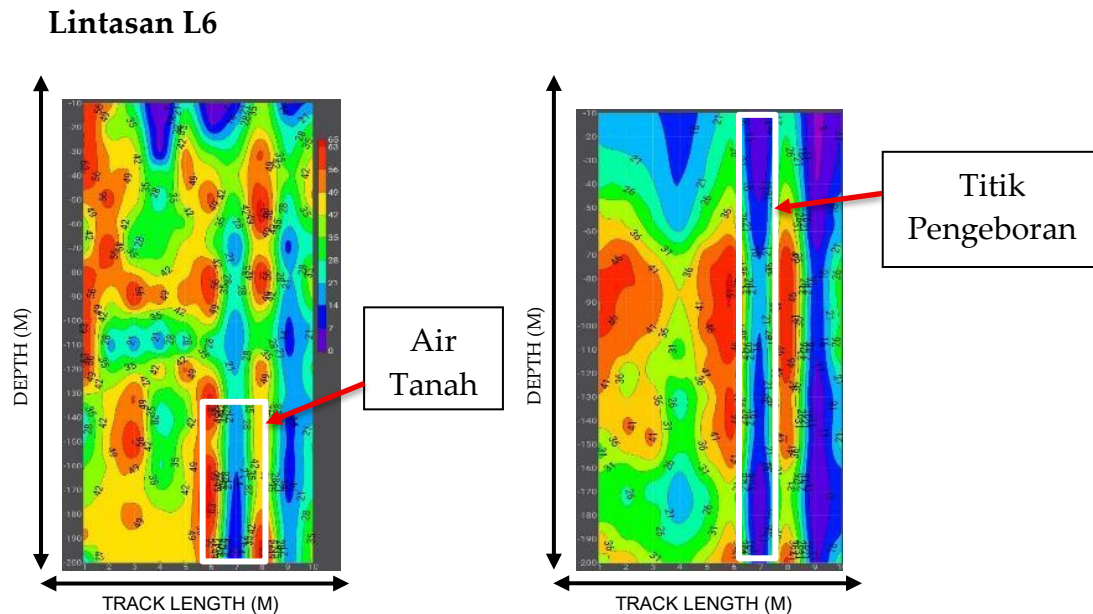
Gambar 11. Lintasan L4 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Interpretasi resistivitas pada Gambar 11 menunjukkan adanya variasi litologis yang sangat terkait dengan karakter hidrogeologi lokal. Zona resistivitas sangat rendah ($1-5 \Omega \cdot m$) diinterpretasikan sebagai lempung jenuh air dan tuf yang sangat lapuk yang terakulasi, sehingga meskipun dapat menyimpan air, sulit untuk melepaskannya. Dalam rentang resistivitas sedang ($6-20 \Omega \cdot m$), material didominasi oleh pasir berpasir hingga tufate yang relatif lebih permeabel. Lapisan ini berpotensi menjadi akuifer dengan produktivitas terbatas hingga sedang, tergantung pada tingkat pelapukan dan porositas efektif batuan. Sementara itu, zona resistivitas lebih tinggi ($21-33 \Omega \cdot m$) mewakili breksi vulkanik kompak sampai lava berubah. Lapisan ini berfungsi sebagai akuifer produktif lokal di bagian yang masih cukup berpori, tetapi dalam kondisi padat dan berubah lebih lanjut, batuan cenderung menjadi akuifer dengan permeabilitas rendah. Pada resistivitas di atas $34 \Omega \cdot m$, batuan diartikan sebagai lava andesit atau basal masif yang tidak kedap air (basement) sehingga tidak berfungsi sebagai reservoir air tanah. Pola distribusi ini mencerminkan sistem hidrogeologi vulkanik, di mana akuifer umumnya terbentuk dalam breksi piroklastik dan tertutup, sementara batuan beku keras berfungsi sebagai batas bawah akuifer.



Gambar 12. Lintasan L5 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Penampang lintasan L5 pada Gambar 12 menunjukkan variasi kontras antara zona dengan resistivitas rendah ($19\text{--}37\ \Omega\cdot\text{m}$) dan tinggi ($>67\ \Omega\cdot\text{m}$), yang dapat dikaitkan dengan kondisi geologi dan hidrogeologi lokal. Zona dengan resistivitas rendah, yang ditunjukkan dengan warna ungu hingga biru muda, diinterpretasikan sebagai endapan tanah liat berpasir hingga tuf yang terlapuk dan jenuh oleh air. Kondisi ini mencerminkan adanya lapisan pelapukan vulkanik dengan karakteristik halus hingga sedikit berpori yang bertindak sebagai akuifer berproduktivitas rendah–menengah. Lapisan-lapisan ini berpotensi untuk penyimpanan air tanah, tetapi kemampuan untuk melepaskan air relatif terbatas karena dominasi fraksi tanah liat. Sementara itu, zona dengan resistivitas sedang hingga tinggi ($49\text{--}73\ \Omega\cdot\text{m}$) yang ditunjukkan dengan warna hijau hingga merah diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik padat seperti breksi vulkanik, lava yang berubah, dan andesit atau basal masif. Secara geologi, zona ini mencerminkan bagian batuan keras yang lebih tahan terhadap pelapukan, dengan permeabilitas rendah hingga sangat rendah. Dari sudut pandang hidrogeologi, bagian ini cenderung berfungsi sebagai akuifer terhadap batuan dasar yang tidak tembus air yang membatasi akuifer. Kehadiran retakan lokal di zona resistivitas sedang ($49\text{--}55\ \Omega\cdot\text{m}$) masih memungkinkan adanya akuifer terbatas, tetapi tidak signifikan dibandingkan dengan zona resistivitas rendah.



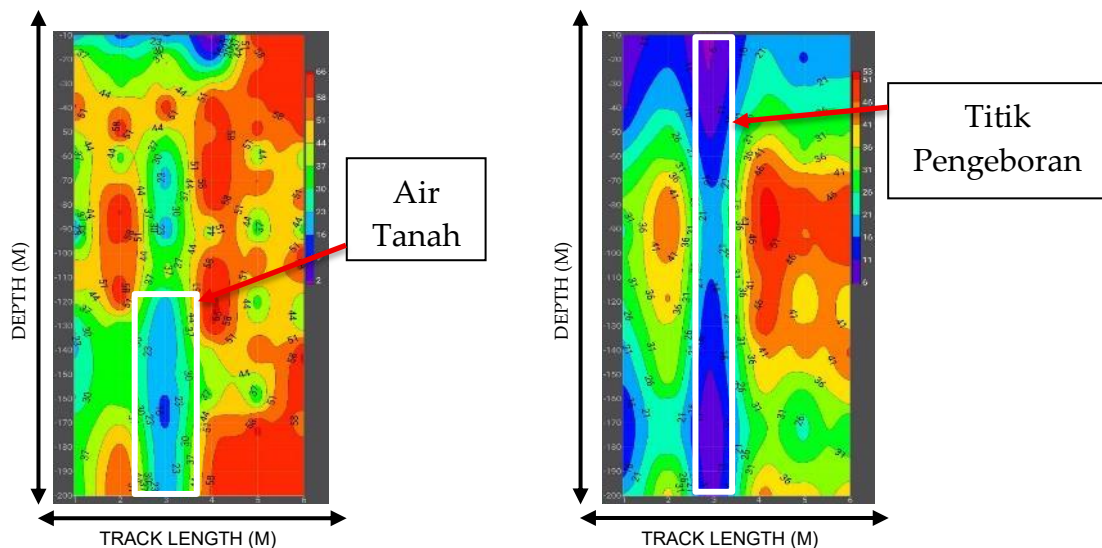
Gambar 13. Lintasan L6 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Hasil interpretasi resistivitas penampang lintasan L6 pada Gambar 13 menunjukkan variasi litologis bawah permukaan dengan nilai 0–65 $\Omega\cdot\text{m}$, mencerminkan perbedaan sifat fisik batuan terhadap aliran listrik. Zona dengan resistivitas sangat rendah (0–14 $\Omega\cdot\text{m}$) yang ditunjukkan dengan warna ungu-biru gelap diinterpretasikan sebagai lapisan lempung jenuh air yang tidak kedap air (aquitard). Sementara itu, zona biru muda hingga hijau (14–42 $\Omega\cdot\text{m}$) mewakili pasir tufa dan lapisan breksi yang tercuap yang masih menyimpan air, sehingga berpotensi menjadi akuifer dengan produktivitas rendah hingga menengah. Pola ini menunjukkan distribusi akuifer dangkal yang terkonsentrasi antara lapisan lempung dan batuan keras. Di sisi lain, zona kuning hingga merah dengan resistivitas lebih tinggi (42–65 $\Omega\cdot\text{m}$) menunjukkan keberadaan breksi vulkanik, lava yang berubah, dan andesit atau basal masif yang lebih tahan terhadap aliran listrik. Batuan ini umumnya berfungsi sebagai lapisan penghalang (akuifer ke batuan dasar) dan tidak memainkan peran signifikan dalam penyimpanan air tanah, kecuali di retakan atau zona pelapukan lokal. Dengan demikian, konfigurasi resistivitas pada penampang ini menunjukkan sistem akuifer yang relatif terbatas, dikendalikan oleh tufa, aliran lava, dan breksi yang terpelapukan yang terperangkap di antara lapisan tanah liat yang kedap air di bagian bawah dan batuan keras vulkanik di bagian atas.

Lintasan L7

Interpretasi resistivitas penampang lintasan L7 dapat dilihat pada Gambar 14; nilai resistivitas rendah (2–23 $\Omega\cdot\text{m}$), yang ditunjukkan oleh warna ungu hingga biru

muda, menunjukkan adanya material tanah liat jenuh air, tufa, dan pasir halus. Lapisan ini memiliki permeabilitas rendah, sehingga berfungsi sebagai akuifer dangkal dengan produktivitas terbatas atau sebagai lapisan kedap air (akuitard) yang menghambat pergerakan air tanah. Pada kedalaman yang lebih besar, zona resistivitas sedang ($23\text{--}37\ \Omega\cdot\text{m}$) dengan warna hijau menunjukkan keberadaan pasir tufaan dan breksi yang lapuk yang berfungsi sebagai akuifer utama. Keberadaan zona ini menunjukkan potensi penyimpanan air tanah yang cukup baik dan memiliki prospek untuk eksplorasi sumber daya air bawah permukaan. Sementara itu, nilai resistivitas sedang hingga tinggi ($37\text{--}66\ \Omega\cdot\text{m}$), yang diwakili oleh kuning hingga merah, menunjukkan keberadaan tufa pasir, breksi vulkanik, lava, dan batuan andesit masif atau basal. Material-material ini cenderung semi-impermeabel hingga tidak tembus, dengan permeabilitas rendah dan kapasitas penyimpanan air yang sangat terbatas, kecuali di zona retakan atau pelapukan. Secara geologi, lapisan kuning-oranye bertindak sebagai semi-akuifer yang membatasi sistem akuifer, sementara zona merah dengan resistivitas tertinggi memantulkan batuan dasar (basement) yang tahan dan tidak berfungsi sebagai akuifer. Dengan demikian, konfigurasi penampang resistivitas ini menunjukkan adanya sistem akuifer produktif yang terperangkap di antara lapisan kedap dan semi-kedap air, sehingga penting untuk diperhatikan dalam perencanaan eksplorasi dan pemanfaatan air tanah.



Gambar 14. Lintasan L7 Konfigurasi 0 (kiri) & Konfigurasi 2 (kanan)

Diskusi

Irisan resistivitas dari L1 hingga L7 menunjukkan bahwa sistem hidrogeologi bawah permukaan di bawah PSDKU Lumajang bersifat spasial heterogen, dengan

potensi air tanah dikendalikan oleh variasi litologi, pelapukan, saturasi, dan permeabilitas. Pada L1, interval resistivitas relatif rendah 3–15 $\Omega\cdot\text{m}$ diinterpretasikan sebagai lumpur berpasir dengan saturasi tinggi serta porositas dan permeabilitas yang relatif menguntungkan, sedangkan interval 16–30 $\Omega\cdot\text{m}$ dikaitkan dengan tuff berpasir yang memiliki produktivitas air tanah sedang. Interval resistivitas yang lebih tinggi diinterpretasikan sebagai breksi vulkanik dan lava, yang umumnya memiliki permeabilitas primer lebih rendah kecuali jika terdapat retakan atau zona pelapukan. Pola ini konsisten dengan studi hidrogeofisika yang menunjukkan bahwa resistivitas listrik merespons efek gabungan litologi, saturasi cairan pori, porositas, dan kondisi struktural, artinya interpretasi air tanah harus mempertimbangkan konteks geologi daripada hanya mengandalkan magnitudo resistivitas (Alcalá et al.,2022). Dalam lingkungan vulkanik, perbedaan ini sangat penting karena air tanah dapat disimpan dalam endapan piroklastik yang terlapuk, tufa berpori, retakan, dan kontak vulkanik, sementara lava masif dapat berfungsi terutama sebagai penghalang hidrolis (Irwan,2020). Variasi yang diamati di L1 menunjukkan bahwa sistem air tanah di lokasi studi tidak diwakili oleh satu akuifer homogen tunggal, melainkan oleh unit permeabel yang bervariasi secara spasial yang tertanam dalam material vulkanik yang kurang permeabel.

Prospek air tanah paling signifikan yang diidentifikasi dalam survei terjadi di sepanjang L2 dan L3, di mana zona akuifer yang diinterpretasikan meluas ke kedalaman yang jauh lebih besar daripada yang dikenali pada beberapa profil lain. Pada L2, zona resistivitas rendah terjadi pada kedalaman sekitar 80–120 m dan 160–190 m, sementara material dengan resistivitas menengah diinterpretasikan sebagai breksi tuf dan tuffaceous kompak dengan permeabilitas sedang. L3 juga menunjukkan zona resistivitas rendah yang terkait dengan lempung jenuh atau tuff yang lapuk dan interval 17–22 $\Omega\cdot\text{m}$ yang diinterpretasikan sebagai pasir tuffaceous atau breksi yang tercupuk dengan karakteristik akuifer yang lebih baik. Oleh karena itu, studi ini mengidentifikasi titik pengukuran L2 4–7 pada sekitar 95–180 m dan titik L3 3–6 pada sekitar 100–160 m sebagai zona air tanah prospektif utama. Kejadian zona prospektif yang relatif dalam masuk akal dalam lingkungan hidrogeologi vulkanik Jawa Timur. Toulhier et al. menunjukkan bahwa sistem vulkanik Bromo–Tengger mengandung sistem air tanah dangkal dan dalam yang saling terhubung terkait dengan aliran lava, endapan piroklastik, dan unit gunung berapi-sedimen hilir, dengan pengisian daya yang sangat dipengaruhi oleh curah hujan dan elevasi (Toulhier et al.,2019). Demikian pula, penelitian geofisika di medan vulkanik menunjukkan bahwa kejadian air tanah dapat dikaitkan dengan porositas sekunder

yang dihasilkan oleh pelapukan dan rekahan, bukan porositas primer saja (Robinson et al., 2015). Hasil L2 dan L3 menunjukkan bahwa target pengeboran yang paling menjanjikan dikendalikan oleh kontinuitas dan ketebalan material vulkanik yang terlapuk dan relatif permeabel, bukan hanya oleh anomali resistivitas terendah.

Hasil dari L4–L7 lebih mendukung interpretasi sistem air tanah berlapis dan terbatas secara lokal. L4 memiliki nilai resistivitas sangat rendah sekitar 1–5 $\Omega\cdot m$, diinterpretasikan sebagai tanah liat jenuh dan tufa yang sangat lapuk dengan kemampuan terbatas untuk mentransfer air, sedangkan interval 6–20 $\Omega\cdot m$ mewakili lempung berpasir hingga pasir tufa dengan permeabilitas lebih tinggi. L5 menunjukkan zona resistivitas rendah sekitar 19–37 $\Omega\cdot m$ yang terkait dengan lempung berpasir hingga tufa yang tercuap, sementara zona resistivitas tinggi diinterpretasikan sebagai batuan vulkanik padat. L6 menunjukkan kontras yang sangat jelas antara bahan kaya tanah liat 0–14 $\Omega\cdot m$ dan pasir tuffaceous 14–42 $\Omega\cdot m$ serta breksi yang lapuk, sementara L7 memiliki zona 23–37 $\Omega\cdot m$ yang lebih dalam yang diinterpretasikan sebagai pasir tuffaceous dan breksi yang terlapuk dengan potensi penyimpanan air tanah yang relatif menguntungkan. Hasil ini menggambarkan mengapa resistivitas rendah tidak dapat secara otomatis disamakan dengan akuifer yang produktif. Material jenuh kaya tanah liat dapat menghasilkan respons konduktif yang kuat meskipun memiliki konduktivitas hidrolik rendah. Sebaliknya, batuan vulkanik yang retak atau terlapuk dapat menyediakan jalur air tanah meskipun resistivitas massanya relatif lebih tinggi. Studi yang menggunakan pendekatan geofisika terintegrasi juga menekankan bahwa interpretasi resistivitas menjadi lebih andal ketika dikombinasikan dengan informasi litologi, pengamatan lubang bor, data hidrokimia, atau kendala independen lainnya (Gumilar et al., 2020). Dengan demikian, interpretasi L4–L7 menunjukkan bahwa produktivitas akuifer diatur oleh interaksi antara kondisi jenuh dan permeabilitas efektif, dengan lapisan lempung berpotensi berfungsi sebagai akuidor yang mengkotak-kotakkan unit pembawa air tanah.

Susunan spasial garis survei juga memberikan dasar penting untuk menafsirkan kontinuitas lateral dari anomali yang teridentifikasi. Investigasi menggunakan titik pengukuran yang relatif padat di sepanjang profil dan beberapa garis survei di seluruh kampus, memungkinkan perubahan resistivitas dievaluasi baik secara vertikal maupun lateral. Cakupan spasial semacam ini berharga karena struktur yang mengandung air tanah dapat bervariasi secara signifikan dalam jarak pendek, terutama di medan vulkanik heterogen. Penelitian resistivitas tiga dimensi dan pseudo-tiga dimensi telah menunjukkan bahwa pengukuran geofisika yang

tersebar secara spasial dapat mengungkap jalur air tanah dan heterogenitas bawah permukaan yang mungkin tidak cukup direpresentasikan oleh lubang bor terisolasi atau pengukuran satu dimensi (El-Qady et al.,2021). Studi geofisika terintegrasi juga menunjukkan bahwa menggabungkan pengamatan listrik dan elektromagnetik dapat meningkatkan pembatasan sistem akuifer dangkal dan dalam serta mengurangi ambiguitas dalam interpretasi bawah permukaan (Nguyễn et al.,2022). Hasil saat ini harus dipahami sebagai model hidrogeofisika spasial prospektivitas air tanah, bukan pengukuran langsung hasil akuifer. Perbedaan ini penting karena respons resistivitas yang sama berpotensi dihasilkan oleh kombinasi litologi, kandungan tanah liat, saturasi, dan konduktivitas fluida pori yang berbeda. Interpretasi profil L1–L7 dengan demikian memberikan dasar untuk memprioritaskan lokasi untuk penyelidikan lebih lanjut, sementara produktivitas hidrolik aktual dari setiap target tetap menjadi subjek verifikasi lapangan.

Dari perspektif pengelolaan air tanah, identifikasi zona prospektif L2 dan L3 memberikan dasar praktis untuk mengatasi kendala pasokan air musiman di PSDKU Lumajang. Namun, hasilnya harus diinterpretasikan sebagai target pengeboran prospektif daripada sumur produktif yang dikonfirmasi. Perbedaan ini konsisten dengan penelitian hidrogeofisika yang menekankan bahwa survei geofisika paling efektif jika digunakan sebagai komponen pendukung keputusan dalam investigasi air tanah terintegrasi yang mencakup informasi geologi, pengeboran eksplorasi, pencatatan sumur, pemantauan tingkat air, uji pemompaan, dan penilaian kualitas air (Chen et al.,2022). Perbedaan ini sangat relevan di PSDKU karena lubang bor yang ada dilaporkan mengalami penipisan musiman, menunjukkan bahwa ketersediaan air tanah dipengaruhi tidak hanya oleh penyimpanan bawah permukaan tetapi juga oleh dinamika pengisian ulang dan abstraksi. Sistem hidrogeologi Bromo–Tengger menyediakan analog regional yang menunjukkan bahwa pengisian ulang di akuifer vulkanik sangat terkait dengan distribusi curah hujan dan arsitektur endapan vulkanik. Oleh karena itu, pengembangan target L2–L3 di masa depan harus disertai dengan pemantauan tingkat air tanah dan laju pengambilan air serta perlindungan area pengisian ulang potensial. Tinjauan terbaru lebih menekankan bahwa metode geofisika dapat mendukung penempatan sumur dan pengelolaan sumber daya air tanah, tetapi keberlanjutan jangka panjang memerlukan integrasi dengan pemantauan dan pengelolaan hidrogeologi. Oleh karena itu, studi ini tidak hanya memberikan peta awal potensi air tanah di PSDKU Lumajang, tetapi juga dasar teknis untuk mengurangi ketidakpastian sebelum pengeboran dan mengembangkan strategi pasokan air kampus yang lebih berkelanjutan.

Kesimpulan

The groundwater investigation at PSDKU Lumajang successfully characterized the subsurface hydrogeological conditions using the geoelectrical resistivity approach across seven survey lines (L1–L7). The results indicate that groundwater potential is spatially heterogeneous and is primarily controlled by variations in volcanic lithology, weathering intensity, saturation, and permeability. The interpreted resistivity sections identified several potential groundwater-bearing units, particularly within weathered volcanic breccia and sandy tuff. The most prospective zones were identified along L2 at measurement points 4–7, at depths of approximately 95–180 m, and L3 at points 3–6, at depths of approximately 100–160 m, which were interpreted as priority targets for groundwater development. The findings provide a technical basis for selecting potential locations for new boreholes to improve the reliability of the PSDKU Lumajang water supply, particularly during the dry season when the existing boreholes experience reduced availability. However, the identified zones should be regarded as prospective groundwater targets rather than confirmed productive aquifers, because geophysical interpretation alone cannot directly determine actual well discharge, hydraulic conductivity, or long-term groundwater sustainability. Therefore, verify the L2 and L3 targets through exploratory drilling, lithological logging, groundwater-level measurements, pumping tests, and water-quality analysis before permanent borehole development. The next stage should prioritize verification drilling in the L2 and L3 prospective zones, followed by hydrogeological testing and groundwater monitoring. In addition, the campus water-management strategy should incorporate protection of potential recharge areas and control of groundwater abstraction to ensure that developing new groundwater sources provides a sustainable long-term water supply for academic, laboratory, and operational activities at PSDKU Lumajang.

Pengakuan/Acknowledgment

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Politeknik Negeri Malang atas dukungan keuangan.

Daftar Referensi

Adi Prabowo, Hartono, H., & Kaeni, O. (2022). Groundwater survey using resistivity method for drought mitigation in Bima Regency, West Nusa Tenggara. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 11(2), 207–218. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v11i2.13895>

- Alcalá, F. J., Paz, M. C., Martínez-Pagán, P., & Monteiro Santos, F. (2022). Integrated geophysical methods for shallow aquifer characterization and modelling. *Applied Sciences*, 12(5), 2271. <https://doi.org/10.3390/app12052271>
- Bennett, G. (2024). Analysis of methods used to validate remote sensing and GIS-based groundwater potential maps in the last two decades: A review. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(1), 100245–100245. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100245>
- Chen, H. (2022). Exploring subsurface hydrology with electrical resistivity tomography. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00350-4>
- Chen, X., Guo, Z., Liu, C., Liu, J., & Wu, Q. (2022). Groundwater detection using the Pseudo-3D resistivity method: A history of case studies. *Applied Sciences*, 12(13), 6788. <https://doi.org/10.3390/app12136788>
- Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Bierkens, M. F. P., Ferguson, G., & Taylor, R. G. (2023). Defining renewable groundwater use and its relevance to sustainable groundwater management. *Water Resources Research*, 59(9). <https://doi.org/10.1029/2022wr032831>
- de Graaf, I. E. M., Marinelli, B., & Liu, S. (2024). Global analysis of groundwater pumping from increased river capture. *Environmental Research Letters*, 19(4), 044064. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad383d>
- El-Qady, G., Shaaban, H., Abdel Zaher, M., & Atya, M. (2021). Integrated Electromagnetic survey for groundwater exploration: Case study at El-Minya, western desert of Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 10(1), 387–396. <https://doi.org/10.1080/20909977.2021.1979889>.
- Elshall, A. S., Arik, A. D., El-Kadi, A. I., Pierce, S., Ye, M., Burnett, K. M., Wada, C. A., Bremer, L. L., & Chun, G. (2020). Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy. *Environmental Research Letters*, 15(9), 093004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8e8c>
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1), 431–463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Gumilar Utamas Nugraha, Karit Lumban Gaol, Hartanto, P., & Hendra Bakti. (2020). Aquifer vulnerability: Its protection and management—A case study in Pangkalpinang City, Indonesia. *International Journal of Geophysics*, 2020, 1–23.

<https://doi.org/10.1155/2020/8887914>

- Irwan, I. (2020). Three-dimensional resistivity model for groundwater exploration in volcanic zone of Tidar Plateau, Malang, East Java. *Indonesian Physical Review*, 3(1), 30–37. <https://doi.org/10.29303/ipr.v3i1.39>
- Kebede, M. M., Kumar, M., Mekonnen, M. M., & Clement, T. P. (2024). Enhancing groundwater recharge through nature-based solutions: Benefits and barriers. *Hydrology*, 11(11), 195. <https://doi.org/10.3390/hydrology11110195>
- Khan, U., & Baba, A. (2026). Groundwater recharge and MAR modelling: Input data, controlling processes, and future research priorities. *Environmental Earth Sciences*, 85(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-026-13033-w>
- Kirana, A. P., Ariyanto, R., Ririd, A. R. T. H., Amalia, E. L., & Bhawiyuga, A. (2023). Analysis of agricultural drought monitoring based on vegetation health index in East Java, Indonesia using MODIS satellite data. *Novel Perspectives of Geography, Environment and Earth Sciences*, Vol. 6, 109–120. <https://doi.org/10.9734/bpi/npgees/v6/5388e>
- Le Cointe, P., Nuttinck, V., & Rinaudo, J.-D. (2020). A tool to determine annual groundwater allocations in the Tarn-et-Garonne alluvial aquifer (France). *Global Issues in Water Policy*, 253–274. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_13
- Levintal, E., Kniffin, M. L., Ganot, Y., Marwaha, N., Murphy, N. P., & Dahlke, H. E. (2022). Agricultural managed aquifer recharge (Ag-MAR)—A method for sustainable groundwater management: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(3), 291–314. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2050160>
- Nandi, S., & Swain, S. (2024). Role of groundwater systems in fulfilling sustainable development goals: A focus on SDG6 and SDG13. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 42, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100576>
- Nguyễn Tiến Thành, Pongsathron Thunyawatcharakul, Nguyen Huu Ngu, & Srilert Chotpantararat. (2022). Global review of groundwater potential models in the last decade: Parameters, model techniques, and validation. *Journal of Hydrology*, 614, 128501–128501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128501>
- Ogunkoya, C. O. (2025). A review: The role of electrical resistivity in groundwater exploration and management. *Journal of Multidisciplinary Science: MIKAILALSYS*, 3(2), 833–845. <https://doi.org/10.58578/mikailalsys.v3i2.5666>

- Riwaz Kumar Adhikari, Abdullah Gokhan Yilmaz, Bandita Mainali, Dyson, P., & Monzur Alam Imteaz. (2022). Methods of groundwater recharge estimation under climate change: A review. *Sustainability*, 14(23), 15619–15619. <https://doi.org/10.3390/su142315619>.
- Robinson, J., Slater, L., Johnson, T., Shapiro, A., Tiedeman, C., Ntarlagiannis, D., Johnson, C., Day-Lewis, F., Lacombe, P., Imbrigiotta, T., & Lane, J. (2015). Imaging pathways in fractured rock using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Groundwater*, 54(2), 186–201. <https://doi.org/10.1111/gwat.12356>.
- Rockhold, M. L., Robinson, J. L., K. Parajuli, Song, X., Zhang, Z. F., & Johnson, T. C. (2020). Groundwater characterization and monitoring at a complex industrial waste site using electrical resistivity imaging. *Hydrogeology Journal*, 28(6), 2115–2127. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02167-1>.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H. M., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., ... Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>.
- Sejati, S. P., & Prayoga, R. E. (2024). Analysis of unconfined groundwater availability during dry and rainy season using dynamic approach in Ngemplak, Sleman, Yogyakarta, Indonesia. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, Dan Praktik Dalam Bidang Pendidikan Dan Ilmu Geografi*, 28(1). <https://doi.org/10.17977/um017v28i12023p38-51>.
- Supandi, S. (2021). Determination of deep well using resistivity method in South Amanuban, Timor Tengah Selatan Regency, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 8(2), 255–264. <https://doi.org/10.17014/ijog.8.2.255-264>
- Toulier, A., Baud, B., de Montety, V., Lachassagne, P., Leonardi, V., Pistre, S., Dautria, J.-M., Hendrayana, H., Miftakhul Fajar, M. H., Satria Muhammad, A., Beon, O., & Jourde, H. (2019). Multidisciplinary study with quantitative analysis of isotopic data for the assessment of recharge and functioning of volcanic aquifers: Case of Bromo-Tengger Volcano, Indonesia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100634>
- Vogelgesang, J. A., Holt, N., Schilling, K. E., Gannon, M., & Tassier-Surine, S. (2020). Using high-resolution electrical resistivity to estimate hydraulic conductivity and improve characterization of alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 580, 123992–123992. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123992>