



Identifikasi Jalur Air Panas dengan Menggunakan Metode Geolistrik 2D dan *Very Low Frequency Electromagnetic* di Desa Muara Putih, Kecamatan Natar, Lampung Selatan

Ahmad Rozali Atsani, Raka Putra Pratama Rumansah, Ibrani Uli Saragi, Muhammad Hashfi Cahyanto, Selvi Misnia Irawati*

Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

Abstrak

Mata air panas Cisarua di Desa Muara Putih, Natar, Lampung Selatan, merupakan manifestasi panas bumi yang terletak jauh dari zona vulkanik aktif, sehingga memerlukan penelitian untuk memahami mekanisme kemunculannya. Daerah ini tersusun atas endapan vulkanik muda, Formasi Lampung, dan batuan malihan, serta dilalui patahan berarah barat laut–tenggara sebagai bagian dari Sesar Lampung Panjang. Penelitian ini bertujuan mendeteksi jalur aliran fluida panas bumi melalui kombinasi metode Geolistrik 2D dan *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM). Pengukuran dilakukan pada dua lintasan terintegrasi, sepanjang 350 m dan 470 m. Data VLF-EM diolah menggunakan filter NA-MEMD, Fraser, dan Karous-Hjelt serta inversi 2D. Hasilnya menunjukkan anomali resistif vertikal ($\leq 100 \Omega\text{m}$) dan anomali resistif dangkal ($\leq 60 \Omega\text{m}$) yang diduga jalur fluida. Tiga lapisan utama teridentifikasi: *top soil* ($>80 \Omega\text{m}$), lempung tufan (0–20 Ωm), dan lempung pasir (20–70 Ωm). Pada lintasan pertama terindikasi tiga zona sesar, salah satunya sesuai dengan penelitian sebelumnya yang diperkirakan sebagai jalur air panas dengan arah barat laut–tenggara. Lintasan kedua tidak menunjukkan sesar karena tidak adanya kontras anomali resistivitas dan tidak didukung oleh data sekunder atau penelitian yang lain. Kedua metode menunjukkan pola resistivitas yang selaras, sehingga efektif digunakan untuk studi pendahuluan panas bumi.

Kata kunci: Panas Bumi; Geolistrik 2D; VLF-EM; Aliran Panas Bumi; Muara Putih

Abstract

The Cisarua hot spring in Muara Putih Village, Natar District, South Lampung, represents a geothermal manifestation located far from active volcanic zones, necessitating further study to understand its emergence mechanism. The area is composed of young volcanic deposits, the Lampung Formation, and metamorphic rocks, intersected by a northwest–southeast trending fault that is part of the active Lampung Panjang Fault system. This study aims to detect geothermal fluid pathways using a combination of 2D geoelectrical and Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) methods. Measurements were conducted along two integrated survey line of 350 m and 470 m. VLF-EM data were processed using NA-MEMD, Fraser, and Karous-Hjelt filters, followed by 2D inversion. Results reveal vertical resistive anomalies ($\leq 100 \Omega\text{m}$) and shallow resistive zones ($\leq 60 \Omega\text{m}$) interpreted as fluid pathways. Three main subsurface layers were identified: topsoil ($>80 \Omega\text{m}$), tuffaceous clay (0–20 Ωm), and sandy clay (20–70 Ωm). On the first survey line, three fault zones were identified, one of which corresponds to previous studies and is interpreted as a hot spring pathway trending northwest–southeast. The second survey line did not reveal any fault structures due to the absence of resistivity anomaly contrasts and the lack of supporting secondary data or prior research. Both methods exhibited consistent resistivity patterns, demonstrating their effectiveness for preliminary geothermal studies.

Keywords: Geothermal Energy; 2D Geoelectrical; Very Low Frequency; Hot Fluids Pathway; Muara Putih

* Korespondensi : selvi.irawati@tg.itera.ac.id

Diajukan : 9 Agustus 2025

Diterima : 28 November 2025

Diterbitkan : 16 Maret 2026

PENDAHULUAN

Mata air panas Cisarua yang terletak di Desa Muara Putih, Kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan, merupakan manifestasi panas bumi yang lokasinya tidak berdekatan langsung dengan zona pegunungan yang umumnya menjadi pusat aktivitas panas bumi. Lokasi mata air panas Cisarua berada sekitar 4 km di sebelah timur pusat Kota Natar dan berjarak 15 km di utara Kota Bandar Lampung, mencakup area survei seluas kurang lebih 10 km² dengan koordinat 525879 E dan 9413004 N (Suharno dkk., 2012).

Geologi regional wilayah penelitian mengacu pada pemetaan oleh Mangga dkk. (1993) dalam lembar Tanjungkarang skala 1:250.000 (Gambar 1). Secara morfologi, area ini berada di zona peralihan antara dataran dan kaki Gunung Betung di bagian selatan. Secara stratigrafi, satuan batuan di daerah penelitian dari tertua ke termuda adalah sebagai berikut (Mangga dkk., 1993):

1. Kompleks Gunung Kasih (Pzg): Batuan malihan berupa sekis, gneiss, kuarsit, dan marmer berumur Pra-Tersier, yang merupakan batuan dasar (*basement*) regional.
2. Diorit dan Diorit Kuarsa (Kds): Batuan beku *intrusif* berumur Kapur yang menerobos Kompleks Gunung Kasih.
3. Granodiorit Branti (Kgdb): Batuan beku *intrusif* berumur Kapur-Paleogen.
4. Marmer Trimulyo (Pzgm): Satuan metamorf yang terbentuk dari kontak metamorfisme antara intrusi granitoid dengan batugamping.
5. Formasi Lampung (QTI): Batuan sedimen vulkaniklastik berupa batupasir tufan, konglomerat, lempung tufan, dan sisipan batugamping, berumur Plio-Plistosen.
6. Endapan Vulkanik Muda (Qhvp): Produk vulkanik tidak terkonsolidasi hingga setengah terkonsolidasi berupa lava, breksi vulkanik, dan tuf, berumur Holosen.

Struktur geologi utama di daerah penelitian adalah Sesar Lampung Panjang dengan orientasi barat laut–tenggara (NW–SE) yang bersifat aktif (Suharno dkk., 2012). Kemunculan mata air panas Cisarua berkaitan erat dengan keberadaan sesar ini sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal dari kedalaman menuju permukaan.

Kemunculan mata air panas di Cisarua tergolong unik karena berbeda dari manifestasi panas bumi pada umumnya yang biasanya ditemukan di sekitar kawasan gunung api. Lokasi ini berada di wilayah yang relatif datar dan

terletak cukup jauh dari aktivitas vulkanik, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami mekanisme yang memicu munculnya mata air panas di daerah tersebut (Juliarka & Iqbal, 2020).

Penelitian sebelumnya oleh Juliarka & Iqbal (2020) menggunakan metode gaya berat (*gravity*) mengidentifikasi struktur *horst* dan *graben* di area Mata Air Panas Natar. Iqbal dkk. (2019) mengklasifikasikan manifestasi panas bumi Natar dan Cisarua sebagai mata air panas bertipe bikarbonat yang bersumber dari Reservoir Natar pada kedalaman 285–400 m dengan temperatur 120–140°C. Namun, kedua penelitian tersebut belum mengidentifikasi secara spesifik jalur keluarnya air panas pada zona dangkal.

Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM) untuk mendeteksi patahan sebagai jalur fluida hidrotermal. Metode Geolistrik 2D digunakan sebagai model awal pengolahan data VLF-EM dan validasi keterkaitan hasil kedua metode.

METODOLOGI

Metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM)

Metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM) merupakan teknik elektromagnetik pasif yang memanfaatkan radiasi elektromagnetik dari pemancar radio navigasi militer sebagai sumber gelombangnya (Chabaane dkk., 2017). Frekuensi yang digunakan dalam metode ini berada pada kisaran rendah, yaitu antara 15 hingga 30 kHz, yang dipancarkan sebagai medan elektromagnetik utama melalui gelombang tanah (*groundwave*) akibat interaksi antara inti bumi dan ionosfer (Özürlan & Sahin, 2006; Lin & Jeng, 2010). Sinyal VLF yang ditangkap oleh alat penerima merupakan hasil penjumlahan antara medan primer (H_p) dan medan sekunder (H_s). Medan sekunder ini terbentuk melalui proses induksi elektromagnetik oleh objek konduktif bawah permukaan. Respons medan elektromagnetik total (H_R) yang diukur men cerminkan perbedaan fase antara komponen primer dan sekunder, yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$H_R = H_p + H_s H_R = |H_p|e^{i\omega t} + |H_s|e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (1)$$

Data pengukuran VLF-EM diperoleh dalam bentuk rasio antara komponen *in-phase* dan *out-*

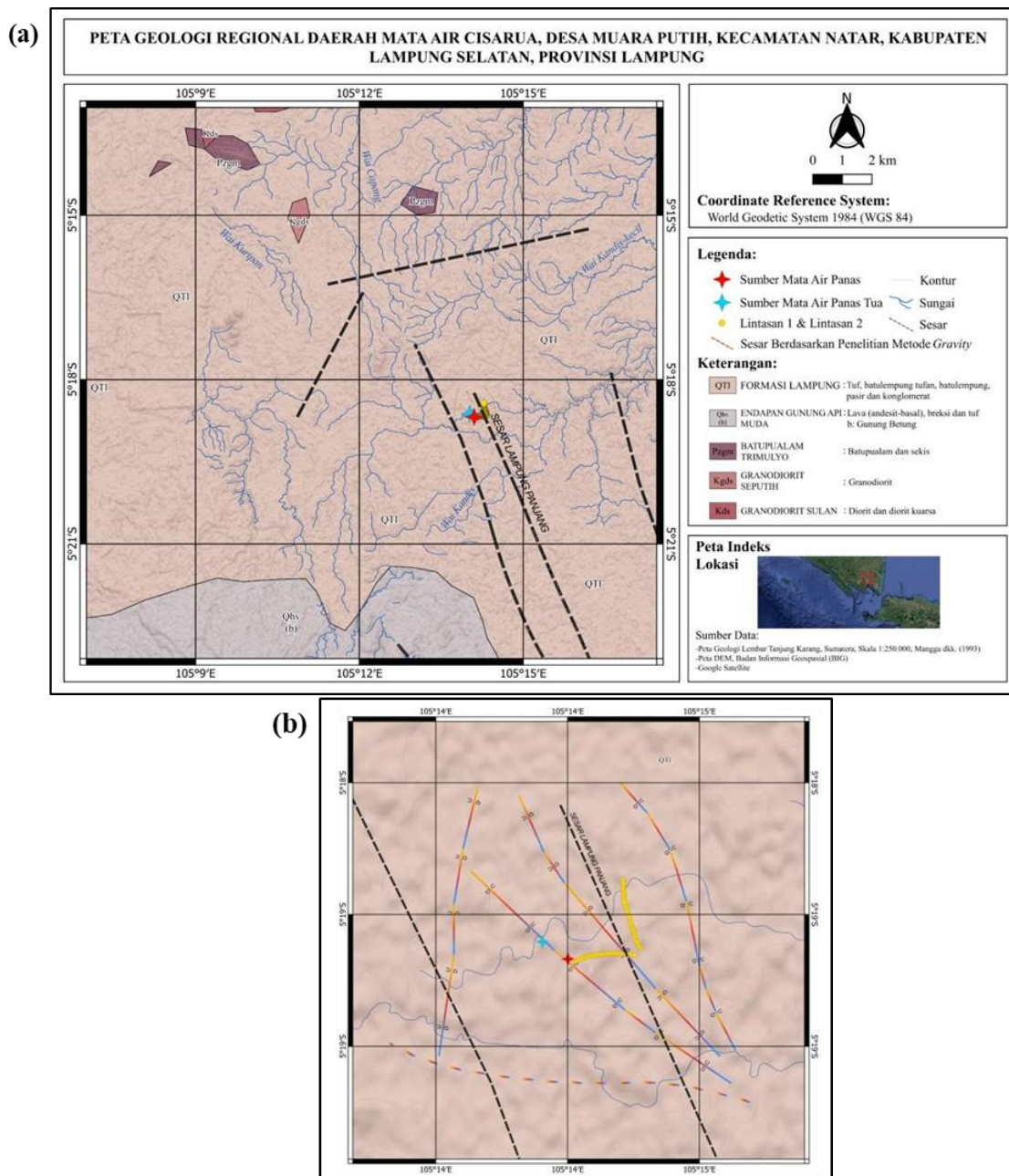
phase dari medan magnet vertikal dan horizontal, yaitu H_{RZ}/H_{RY} , yang merepresentasikan perubahan distribusi resistivitas di bawah permukaan (Chabaane dkk., 2017). Komponen *in-phase* menunjukkan respons medan magnet terhadap perubahan struktur geologi akibat gangguan eksternal, sedangkan *out-phase* menggambarkan respons medan elektromagnetik terhadap variasi vertikal resistivitas pada kedalaman dangkal (Özürlan & Sahin, 2006).

Kedua parameter ini digunakan untuk

mengevaluasi karakteristik struktur bawah permukaan, terutama dalam mendeteksi sesar dangkal. Medan magnet yang diukur dapat dinyatakan secara vektor sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ H_{RY} \\ H_{RZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ H_{PY} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ H_{SY} \\ H_{SZ} \end{pmatrix} \quad (2)$$

dengan $H_P \gg H_S$, H_P adalah medan primer, dan H_S adalah medan sekunder yang dihasilkan oleh



Gambar 1. (a) Peta geologi di Natar dan sekitarnya (Mangga dkk., 1993) ; (b) Estimasi keberadaan sesar normal pada peta geologi regional dengan menggunakan metode gaya berat (Juliarka & Iqbal (2020)).

proses induksi elektromagnetik pada konduktor bawah permukaan. Frekuensi sudut pemancar dituliskan sebagai ω , dan pergeseran fase antar komponen medan magnetik ditunjukkan oleh ϕ (Lin & Jeng, 2010). Konsep pengukuran VLF-EM mengasumsikan model konduktivitas 2D pada bawah permukaan, dengan arah sumbu-x sejajar dengan struktur geologi, dan sumbu-y sesuai dengan lintasan pengukuran (profil). Peralatan GSM-19 digunakan untuk memperoleh komponen medan magnet vertikal (H_z) dan horizontal (H_y), parameter tipper B dihitung berdasarkan hubungan $H_z = B \cdot H_y$, sebagai hasil selisih waktu antara medan vertikal dan horizontal akibat fenomena induksi elektromagnetik (Lin & Jeng, 2010). Ilustrasi metode VLF-EM dapat dilihat pada Gambar 2.

Perbedaan polaritas antara medan primer dan sekunder menyebabkan perbedaan resistivitas antara zona konduktif dan resistif. Interpretasi VLF-EM dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu kualitatif, menggunakan filter Fraser atau K-Hjelt untuk mengidentifikasi variasi lateral zona konduktif (Karous & Hjelt, 1983). Sedangkan kuantitatif, melalui proses inversi data VLF-EM menjadi model resistivitas 2D bawah permukaan (Marwan dkk., 2023).

Metode Geolistrik

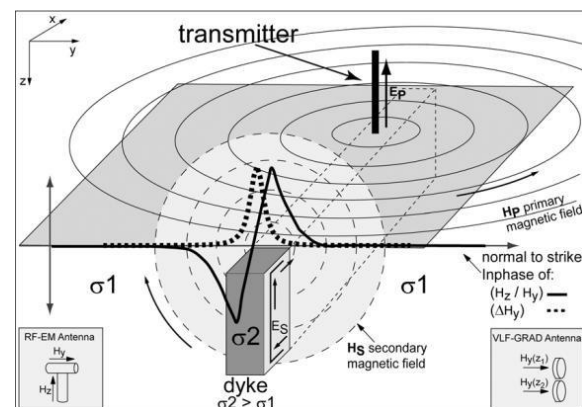
Metode resistivitas listrik atau geolistrik merupakan salah satu metode geofisika yang mengukur tahanan jenis batuan berdasarkan beda potensial listrik yang timbul akibat aliran arus melalui media bawah permukaan (Chambers dkk., 2013). Metode ini umumnya digunakan untuk mengetahui distribusi resistivitas vertikal menggunakan teknik Vertical Electrical Sounding (VES) atau resistivitas 1D, dan juga dapat dikembangkan menjadi profil resistivitas 2D untuk mengidentifikasi variasi lateral bawah permukaan (Leborgne dkk., 2021). Ekipotensial dan garis arus untuk sepasang elektroda arus A dan B pada ruang setengah homogen dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada metode ini, arus listrik dialirkan ke dalam tanah melalui dua elektroda arus (disebut elektroda A dan B) yang terhubung dengan sumber arus, sedangkan beda potensial (ΔV) diukur melalui dua elektroda potensial (M dan N) yang terhubung ke alat ukur tegangan. Besarnya arus (I) dan beda potensial yang terukur digunakan untuk menghitung nilai resistivitas semu (ρ_a) dengan persamaan:

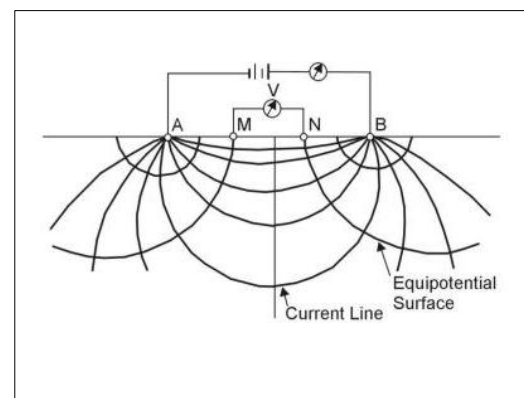
$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

K merupakan faktor geometri yang ditentukan oleh jarak antar elektroda dalam konfigurasi tertentu. Konfigurasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah konfigurasi *Wenner-Alpha*. Nilai resistivitas semu ini mencerminkan sifat kelistrikan batuan bawah permukaan, yang kemudian diinterpretasi untuk mengetahui struktur geologi, seperti lapisan batuan, zona jenuh air, atau keberadaan sesar (Chambers dkk., 2013).

Penelitian ini dilakukan pada Sabtu, 16 November 2024 di Muara Putih, Natar, Lampung Selatan sebanyak 2 lintasan metode geolistrik 2D dan 2 lintasan metode VLF-EM dengan lintasan yang sama pada keduanya. Data penelitian diperoleh dari pengukuran *project* kelas Geofisika Geothermal Program Studi Teknik Geofisika Institut Teknologi Sumatera. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini meliputi Res2DInv untuk proses



Gambar 2. Ilustrasi metode VLF-EM (Chalikakis dkk., 2005).



Gambar 3. Ekipotensial dan garis arus untuk sepasang elektroda arus A dan B pada ruang setengah homogen (EPA, 2007).

Tabel 1. Nilai Resistivitas batuan di wilayah penelitian

Penelitian, Tahun	Jenis Batuan	Nilai Resistivitas (Ωm)
Oloani, 2022	top soil	16 – 46
	lempung tufan	1 – 13
	pasir tufan	16 – 46
Rizka dan Setiawan, 2019	lempung tufan	< 20
	pasir tufan	20 – 80

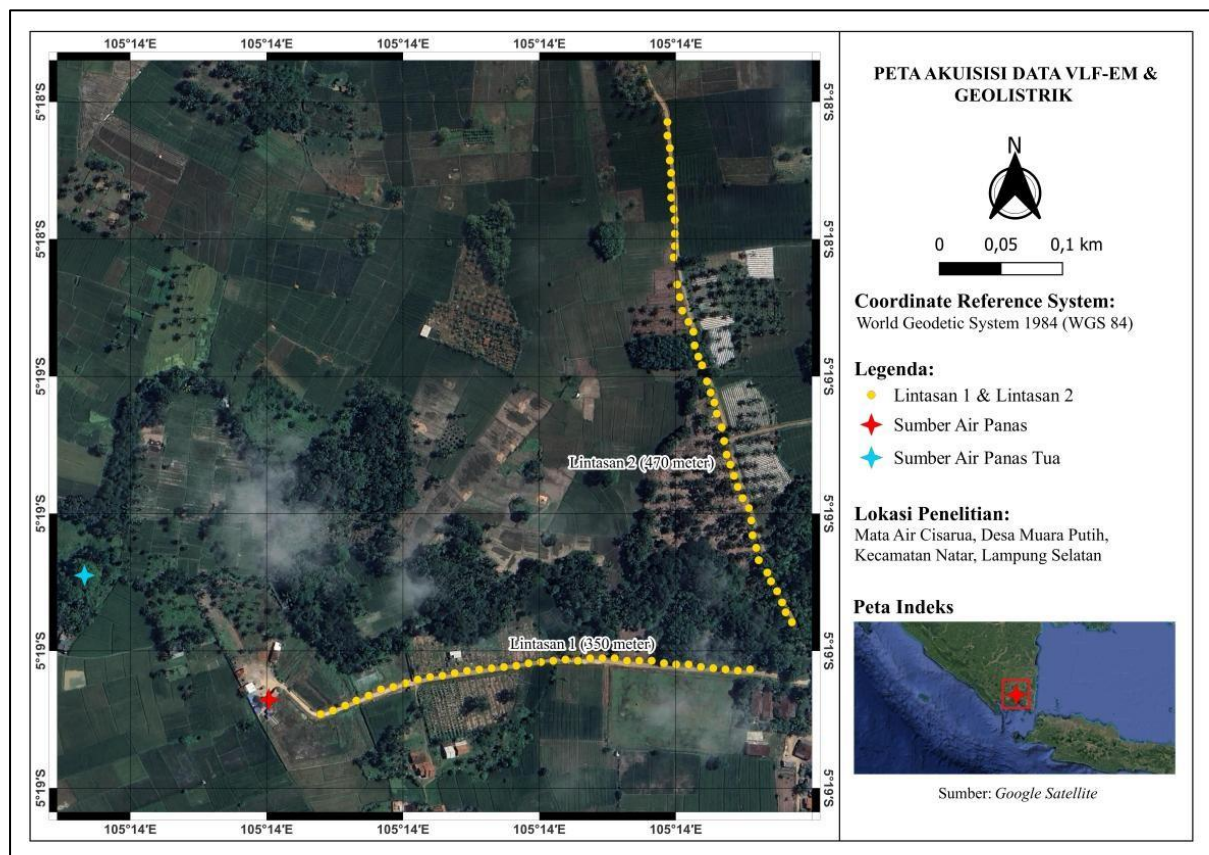
inversi data geolistrik dua dimensi (2D) dengan konfigurasi *Wenner-Alpha*, yang bertujuan menghasilkan penampang distribusi resistivitas bawah permukaan secara kuantitatif. Sementara itu, pada pengolahan data *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM) digunakan perangkat lunak Inv2DVLF untuk melakukan proses inversi dan memperoleh sebaran nilai resistivitas serta kurva *fitting* yang menggambarkan kesesuaian antara data observasi dan hasil pemodelan. Desain akuisisi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4. Metode geolistrik diukur di lokasi yang sama dengan lokasi

pengukuran metode VLF-EM menggunakan konfigurasi *Wenner-Alpha*. Data VLF-EM diperoleh menggunakan peralatan GEM Systems GSM 19-T menggunakan frekuensi 19,8 kHz (NWC) yang ditransmisikan dari Australia Barat dan 19,6 kHz (NLK) dari Amerika Serikat.

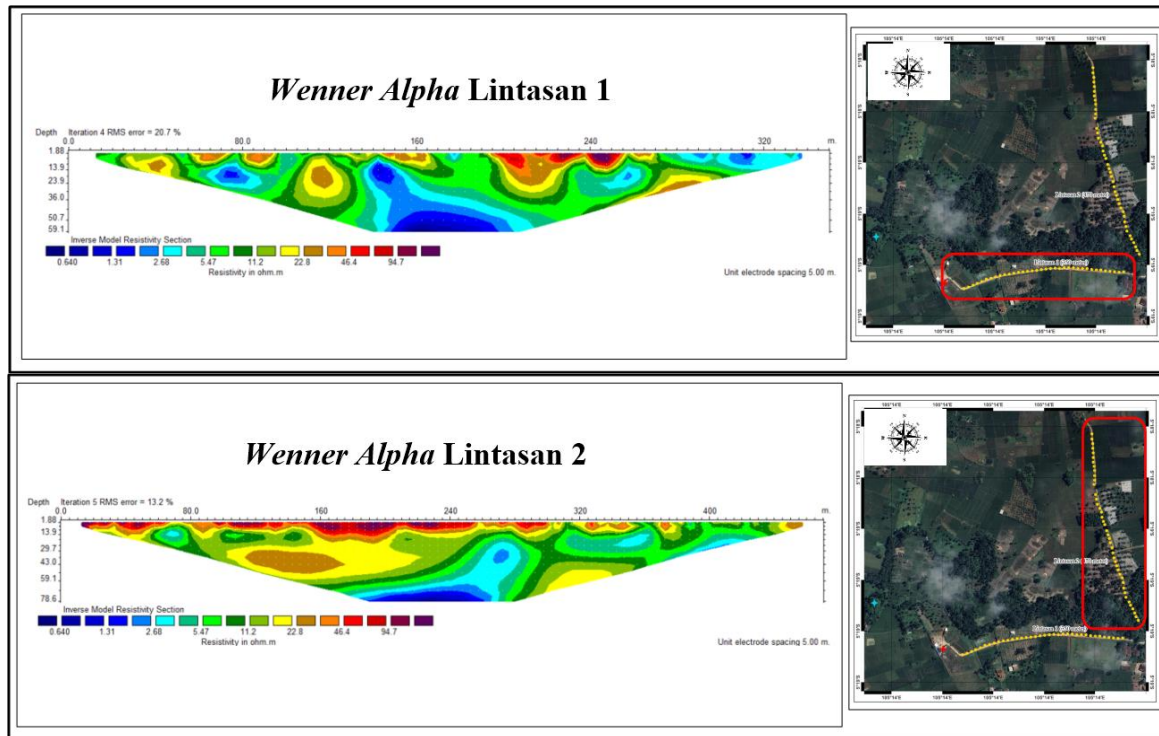
HASIL

Hasil Geolistrik Resistivitas 2D

Profil resistivitas pada Lintasan 1 dan 2 memiliki rentang nilai antara 0,6 hingga 94,7 Ωm . Kedalaman lintasan 1 dengan menggunakan konfigurasi *Wenner-Alpha* memiliki kedalaman 59,1 m dan lintasan 2 memiliki kedalaman 78,6 m. *Wenner-Alpha* memiliki resolusi yang baik, sehingga cocok untuk identifikasi struktur (Putri dkk., 2024). Nilai resistivitas pada Gambar 5 dapat dikelompokkan ke dalam dua rentang klasifikasi. Rentang resistivitas rendah ditunjukkan oleh warna biru tua hingga hijau kebiruan, dengan nilai antara 0,6 Ωm hingga 5,47 Ωm . Sementara itu, rentang resistivitas tinggi ditampilkan dalam warna hijau terang hingga merah tua, dengan nilai berkisar antara 22,8 Ωm hingga 94,7 Ωm .



Gambar 4. Desain akuisisi daerah penelitian (Google Satelite, 2025).



Gambar 5. Penampang resistivitas bawah permukaan pada Lintasan 1 (a) dan Lintasan 2 (b).

Hasil VLF-EM

Pengolahan data VLF-EM dilakukan melalui penerapan filter NA-MEMD (*Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition*), Fraser, dan Karous-Hjelt. NA-MEMD menghasilkan IMF (*Intrinsic Mode Functions*) untuk menyaring gangguan frekuensi ekstrem melalui pemisahan spektrum, sementara filter Fraser, sebagaimana terlihat pada Gambar 6a dan 6b, memperlihatkan bahwa zona resistivitas tinggi dicirikan oleh amplitudo positif dengan gradasi warna menuju merah tua, sedangkan zona resistivitas rendah ditunjukkan oleh amplitudo negatif yang ditampilkan dalam warna biru. Hasil pengolahan menggunakan filter Karous-Hjelt pada Gambar 6a menunjukkan adanya tiga zona resistivitas tinggi dan dua zona resistivitas rendah, sedangkan pada Gambar 6b terdapat lima zona resistivitas tinggi dan tiga zona resistivitas rendah.

Penerapan filter ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis amplitudo, informasi spasial seperti kedalaman dan posisi lateral dari zona konduktif dan resistif belum dapat ditentukan secara pasti (Marwan dkk., 2023). Untuk memperoleh model bawah permukaan yang lebih representatif, dilakukan proses inversi data VLF-EM guna mendapatkan distribusi resistivitas bawah permukaan terhadap jarak dan kedalaman.

Hasil inversi tersebut menghasilkan model geofisika berupa nilai resistivitas, serta posisi horizontal dan vertikal dari anomali, yang dapat digunakan untuk interpretasi struktur geologi dan zonasi resistivitas tinggi di bawah permukaan (Marwan dkk., 2023).

Hasil *plotting* model berupa kurva *fitting* dan penampang bawah permukaan pada lintasan 1 dan 2 berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Pola kecocokan antara data observasi dan estimasi menunjukkan korelasi yang cukup baik, meskipun beberapa titik memiliki deviansi kecil. Pada model hasil inversi VLF-EM pada Lintasan 1 menunjukkan distribusi resistivitas lateral dan vertikal yang mengindikasikan adanya perbedaan litologi dan kemungkinan jalur fluida panas bumi. Zona a, b, d, dan g merupakan zona resistivitas tinggi (nilai resistivitas $>120 \Omega\text{m}$, dengan rentang warna menuju merah tua). Zona c, e, f, dan h ditandai oleh warna menuju biru tua dengan resistivitas $<100 \Omega\text{m}$, yang diinterpretasikan sebagai anomali resistivitas rendah.

Zona ini diduga sebagai jalur aliran fluida panas bumi, terutama pada zona a dan c yang menunjukkan pola vertikal dari kedalaman menuju permukaan. Kedua zona ini memiliki rentang resistivitas rendah (20–60 Ωm) dan ditafsirkan sebagai zona transisi litologi,

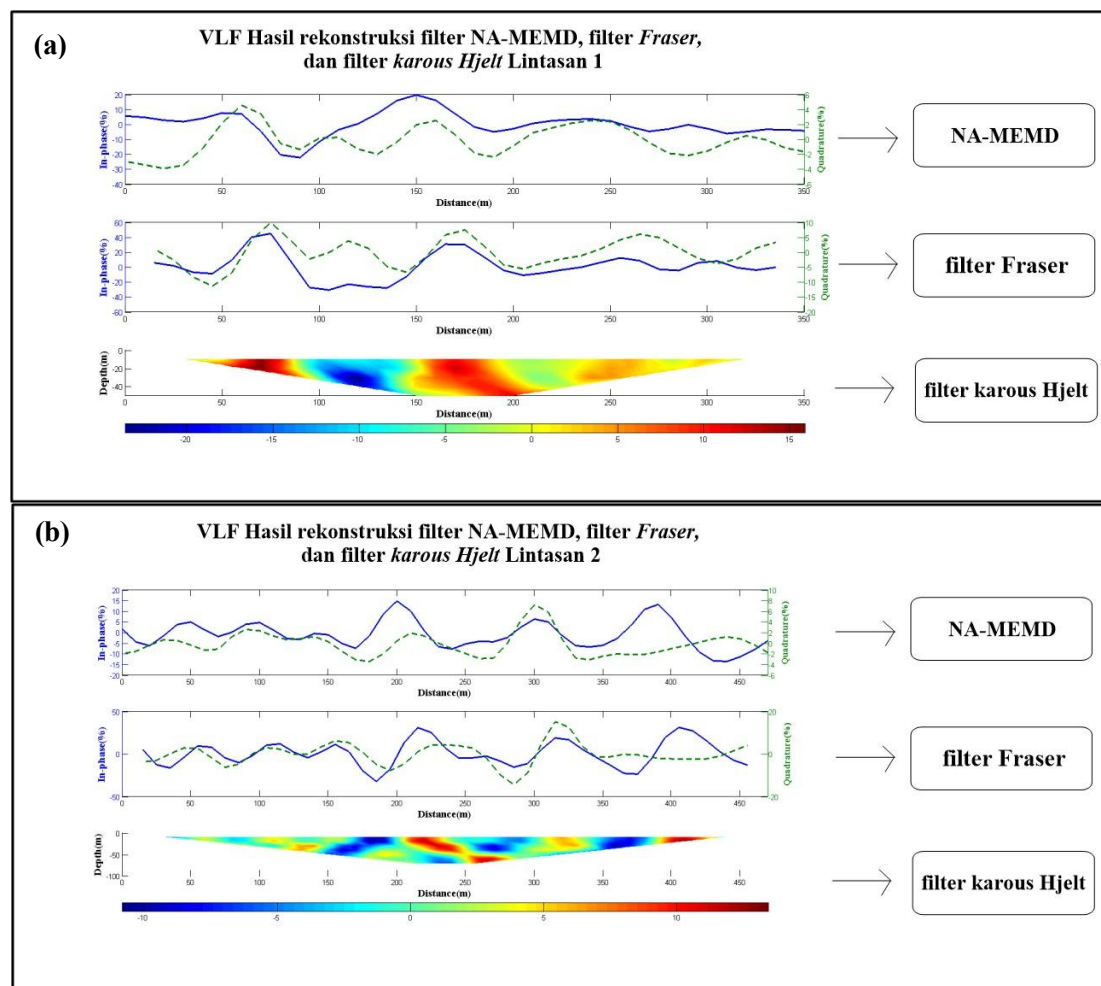
kemungkinan berupa batuan sedimen. Sebaliknya, zona g menunjukkan resistivitas tinggi (80–100 $\Omega\cdot\text{m}$), ditafsirkan sebagai batuan padat atau transisi zona resistivitas rendah menuju tinggi, yang kemungkinan menghalangi rembesan fluida. Kontras resistivitas antara zona d dan zona disekitarnya menunjukkan indikasi kuat adanya struktur rekahan atau sesar, jalur utama migrasi fluida panas bumi.

Pada Lintasan 2, model inversi VLF-EM juga menunjukkan pola resistivitas lateral yang signifikan. Zona b, f, h, i, dan k adalah zona resistivitas tinggi (>140 $\Omega\cdot\text{m}$, warna merah), yang diinterpretasikan sebagai batuan keras atau struktur pengontrol fluida, serupa dengan zona d di lintasan sebelumnya. Zona ini berada di antara beberapa anomali resistivitas rendah, menandakan kemungkinan peran struktur tersebut sebagai jalur migrasi fluida. Sedangkan untuk zona a, c, e, g, dan j menunjukkan resistivitas rendah (<60 $\Omega\cdot\text{m}$, warna biru).

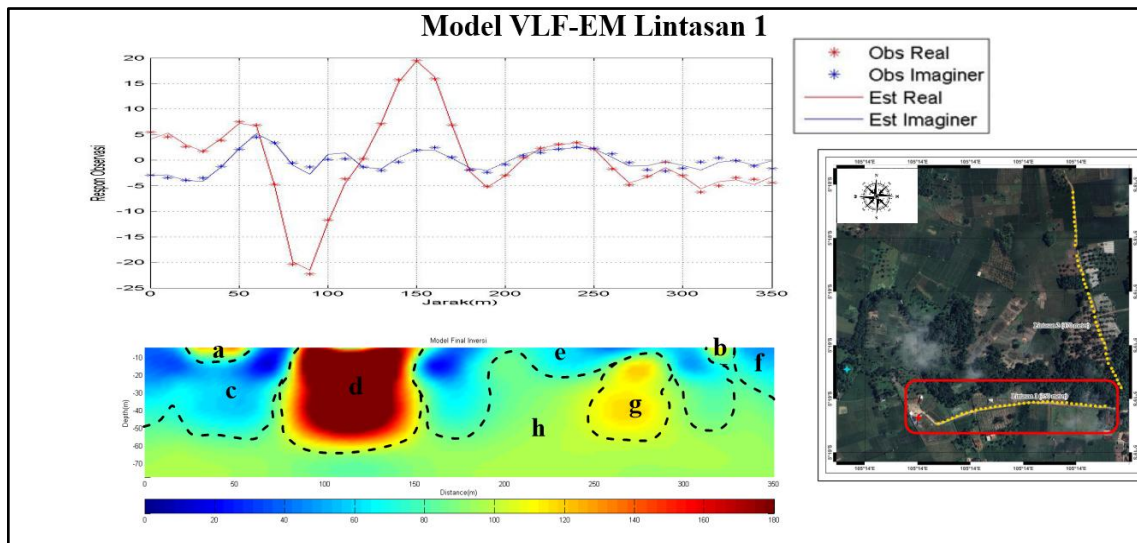
PEMBAHASAN

Dari korelasi yang dihasilkan pada kedua penampang (Geolistrik 2D *Wenner-Alpha* dan model VLF-EM) mulai dari lintasan 1 sampai lintasan 2 memiliki beberapa pola anomali resistivitas rendah dan tinggi yang serupa karena kedua penampang ditampilkan dengan jenis nilai yang sama yakni resistivitas, oleh sebab itu interpretasi jadi lebih mudah dilakukan.

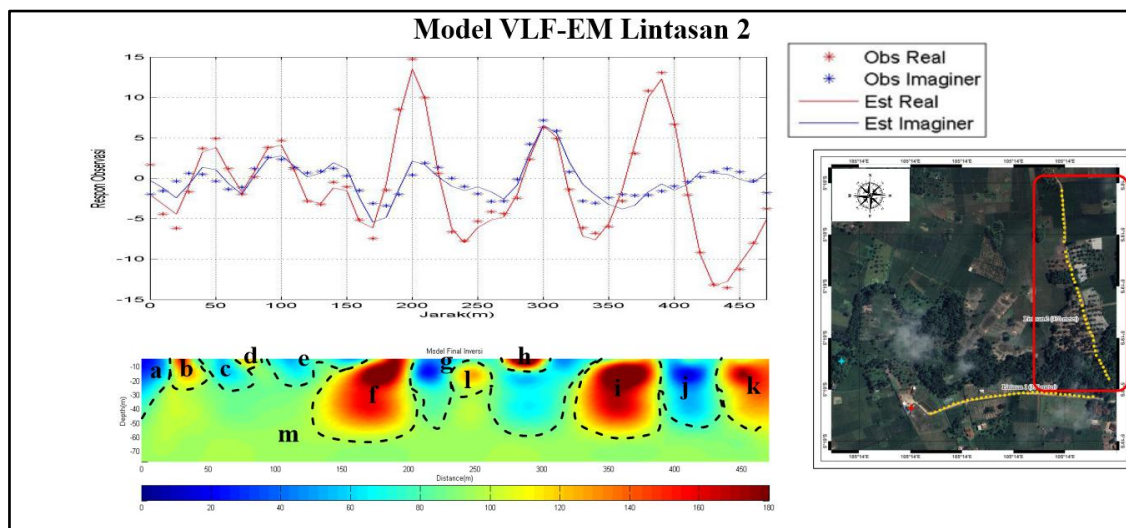
Berdasarkan referensi yang digunakan pada Tabel 1, lintasan 1 dan 2 geolistrik 2D pada lapisan pertama diidentifikasi memiliki tiga lapisan batuan utama, yaitu *top soil* (>80 $\Omega\cdot\text{m}$), lempung tufan (0–20 $\Omega\cdot\text{m}$), dan lempung pasir (20–70 $\Omega\cdot\text{m}$). Ketebalan lapisan *top soil* yang cukup tebal di lokasi penelitian diduga berkaitan dengan aktivitas antropogenik, seperti pengolahan lahan oleh manusia. Dugaan ini diperkuat oleh kondisi di lapangan yang menunjukkan bahwa area tersebut merupakan kawasan persawahan.



Gambar 6. Hasil pengolahan data VLF-EM menggunakan filter NA-MEMD, Fraser, dan Karous-Hjelt pada Lintasan 1 (a) dan Lintasan 2 (b).



Gambar 7. Kurva *fitting* dan model hasil inversi VLF-EM lintasan 1



Gambar 8. Kurva *fitting* dan model hasil inversi VLF-EM lintasan 2.

Lapisan lempung tufan dengan resistivitas sangat rendah ($0-20 \Omega\text{m}$) diinterpretasikan sebagai bagian dari Formasi Lampung (QTI) yang tersusun atas batuan sedimen vulkaniklastik. Sifat lempung yang jenuh air dan kandungan material tufan menyebabkan resistivitas yang rendah. Formasi ini diendapkan dalam lingkungan fluvio-lakustrin pada periode Plio-Plistosen, menghasilkan variasi lateral dan vertikal porositas serta permeabilitas yang tinggi. Lapisan lempung pasir dengan resistivitas sedang ($20-70 \Omega\text{m}$) diduga merupakan zona transisi atau bagian dari Formasi Lampung yang lebih permeabel. Zona ini berpotensi sebagai jalur sirkulasi fluida hidrotermal, terutama pada area yang dipengaruhi oleh struktur rekahan. Kandungan pasir tufan yang lebih tinggi pada

lapisan ini meningkatkan permeabilitas, memungkinkan aliran fluida secara lateral dan vertikal. Pada kedalaman yang lebih dalam ($>60 \text{ m}$), anomali resistivitas tinggi ($>80 \Omega\text{m}$) diinterpretasikan sebagai batuan dasar berupa batuan malihan dari Kompleks Gunung Kasih (Pzg) atau batuan beku intrusif dari Granodiorit Branti (Kgdb) yang bersifat masif dan *impermeable*. Batuan dasar ini berfungsi sebagai *basement* yang membatasi sirkulasi fluida hidrotermal ke kedalaman yang lebih besar.

Zona sesar ketiga yang teridentifikasi pada jarak $280-330 \text{ m}$ dengan orientasi tenggara-barat laut berkorelasi dengan orientasi Sesar Lampung Panjang pada peta geologi regional (Mangga dkk., 1993). Struktur sesar ini berfungsi sebagai jalur utama keluarnya fluida dari kedalaman

menuju permukaan, membentuk manifestasi mata air panas Cisarua. Keberadaan struktur horst dan graben yang diidentifikasi oleh Juliarka & Iqbal (2020) mengindikasikan bahwa sistem panas bumi Cisarua dikontrol oleh aktivitas tektonik aktif Sesar Lampung Panjang. Zona rekahan pada sesar ini menyediakan permeabilitas tinggi yang memungkinkan fluida hidrotermal dari reservoir pada kedalaman 285–400 m (Iqbal dkk., 2019) naik ke permukaan. Karakteristik fluida bertipe bikarbonat yang teramati pada manifestasi Cisarua mendukung interpretasi bahwa sistem ini merupakan sistem panas bumi tipe non-vulkanik yang dikontrol oleh struktur tektonik. Aktivitas tektonik sepanjang Sesar Lampung Panjang menciptakan permeabilitas sekunder melalui pembentukan zona rekahan, yang menjadi jalur preferensial bagi migrasi fluida hidrotermal.

Pada Gambar 9, lintasan pertama korelasi model VLF-EM dan *Wenner-Alpha* menunjukkan adanya tiga zona dugaan sesar yang menjadi jalur potensial keluarnya fluida panas bumi. Zona 1a-2a, 1c-2c, dan 1e-2e merupakan anomali resistivitas tinggi yang mengindikasikan zona batuan kompeten yang sulit dialiri fluida. Sebaliknya, zona 1b-2b, 1d-2d, dan 1f-2f merupakan anomali resistivitas rendah yang mengindikasikan zona lemah berupa batuan permeabel atau zona rekahan yang memfasilitasi aliran fluida.

Zona 1c-2c yang memiliki pola anomali

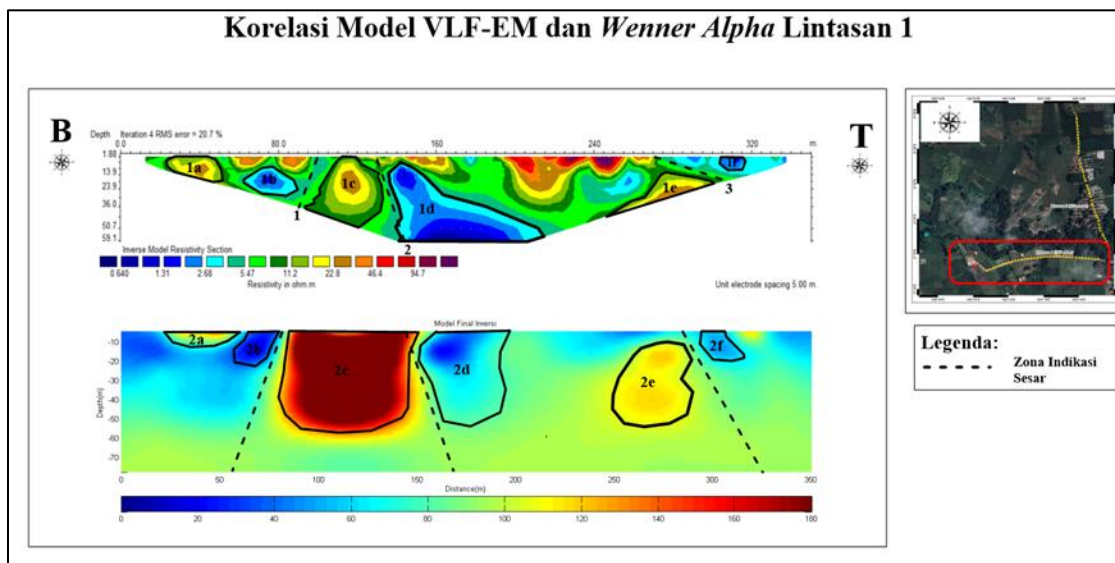
vertikal dengan kontras resistivitas tinggi mengindikasikan keberadaan struktur sesar. Hal ini dibuktikan dengan identifikasi tiga zona dugaan sesar pada korelasi penampang model VLF-EM (Gambar 9) yang menunjukkan diskontinuitas vertikal, karakteristik khas struktur patahan (Marwan dkk., 2023).

Zona sesar pertama teridentifikasi pada jarak 55–90 m dengan orientasi barat daya–timur laut. Zona sesar kedua berada pada jarak 140–165 m dengan orientasi tenggara–barat laut. Zona sesar ketiga teridentifikasi pada jarak 280–330 m dengan orientasi tenggara–barat laut.

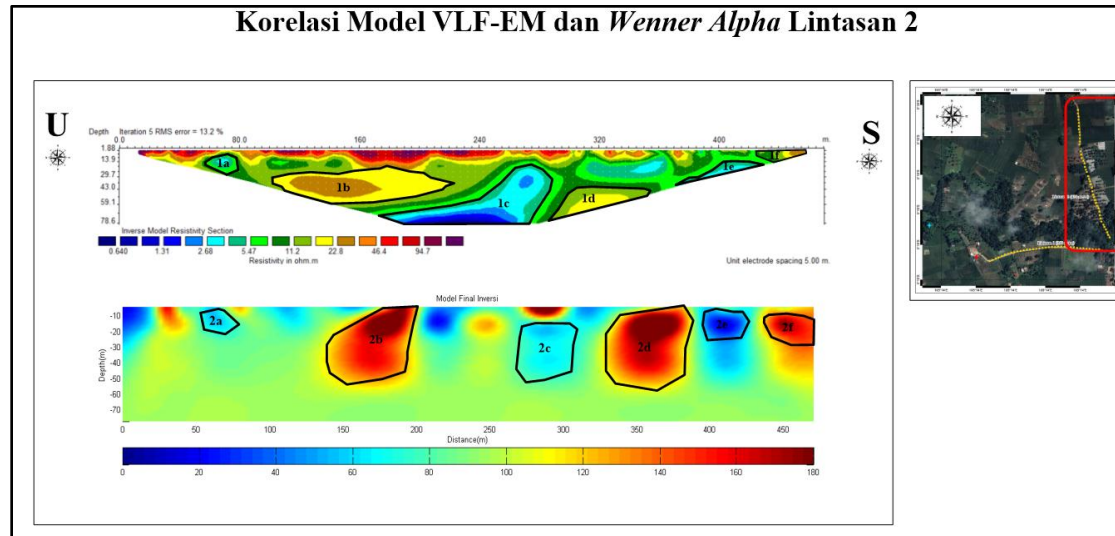
Dugaan zona sesar ketiga yang berada di sebelah timur lintasan berkorelasi kuat dengan hasil penelitian Juliarka & Iqbal (2020) menggunakan metode gaya berat yang mengidentifikasi sesar berorientasi tenggara–barat laut. Struktur ini juga sesuai dengan orientasi Sesar Lampung Panjang yang aktif pada peta geologi regional (Mangga dkk., 1993). Dengan demikian, zona sesar ketiga dapat divalidasi sebagai jalur utama keluarnya air panas Cisarua.

Dugaan zona sesar pertama dan kedua menunjukkan indikasi struktur rekahan sebagai jalur fluida, namun belum dapat divalidasi secara penuh karena keterbatasan data pendukung dari penelitian sebelumnya. Diperlukan investigasi tambahan seperti survei seismik atau tomografi untuk konfirmasi lebih lanjut.

Pada lintasan kedua (Gambar 10), pola ano-



Gambar 9. Korelasi antara model hasil inversi metode geolistrik 2D konfigurasi Wenner-Alpha dan model VLF-EM pada Lintasan 1.



Gambar 10. Korelasi antara model hasil inversi metode geolistrik 2D konfigurasi *Wenner-Alpha* dan model VLF-EM pada Lintasan 2.

mali resistivitas tidak menunjukkan kontras vertikal yang signifikan, sehingga tidak teridentifikasi struktur sesar. Hal ini konsisten dengan posisi geografis lintasan 2 yang tidak dilalui oleh Sesar Lampung Panjang berdasarkan peta geologi regional (Gambar 1a). Zona 1a-2a, 1c-2c, dan 1e-2e menunjukkan resistivitas rendah yang mengindikasikan lapisan lempung jenuh air, sedangkan zona 1b-2b, 1d-2d, dan 1f-2f menunjukkan resistivitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai batuan kompak atau lapisan pasir tufan yang lebih kering.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian yang dilakukan di Mata Air Panas Cisarua, Natar, Lampung Selatan menggunakan metode geolistrik 2D dan VLF-EM berhasil mengidentifikasi tiga lapisan utama, yaitu *top soil* ($>80 \Omega\text{m}$), lempung tufan ($0-20 \Omega\text{m}$), dan lempung pasir (20-70 Ωm). Kedua metode menunjukkan pola anomali yang konsisten. Pada lintasan pertama teridentifikasi tiga indikasi sesar, yakni pada jarak 55-90 m, 140-165 m, dan 280-330 m. Sesar ketiga yang berada di sebelah timur penelitian berkorelasi dengan penelitian sebelumnya dan diduga sebagai zona sesar dengan orientasi tenggara-barat laut, sedangkan dugaan sesar pertama dan kedua yang berada di barat daerah penelitian menunjukkan adanya indikasi sesar sebagai jalur keluar air panas, namun dugaan tersebut belum dapat divalidasi karena kurangnya acuan dalam interpretasi berdasarkan penelitian sebelumnya. Pada lintasan kedua tidak menunjukkan adanya keberadaan dugaan sesar,

yang sejalan dengan geologi regional. Disarankan pengukuran tambahan dengan lintasan lebih bervariasi untuk hasil yang lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera (ITERA) atas dukungan penuh dalam bentuk pendanaan penelitian yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada dosen pembimbing dan tim laboratorium Geofisika ITERA atas bimbingan ilmiah dan bantuan teknis yang diberikan selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Chabaane, A., Redhaounia, B., & Gabtni, H. (2017). Combined application of vertical electrical sounding and 2D electrical resistivity imaging for geothermal groundwater characterization: Hammam Sayala hot spring case study (NW Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 134, 292–298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.003>
- Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Penn, S., Meldrum, P. I., Kuras, O., Loke, M. H., et al. (2013). River terrace sand and gravel deposit reserve estimation using three-dimensional electrical resistivity tomography for bedrock surface detection. *Journal of Applied Geophysics*, 93, 25–32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.002>

- Chalikakis, K., Bosch, F. P., Guérin, R., Gurk, M., & Sorel, D. (2005). First contributions of TEM, RMT, RF-EM and VLF-GRAD to the study of a karstic/alluvial depression in Greece (Northern Peloponnisos). *Seminar Ingenieurund Hydrogeophysik, Konferenzpapier*, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2509.256>
- Google. (2025). *Citra satelit daerah Natar, Lampung Selatan* [Citra satelit]. Google Earth. <https://www.google.com/earth/>
- Iqbal, M., Juliarka, B. R., Ashuri, W., & Al Farishi, B. (2019). Hydrogeochemistry of Natar and Cisarua hot springs in South Lampung, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 4(3), 178. DOI: <https://doi.org/10.25299/jgeet.2019.4.3.4070>
- Juliarka, B. R., & Iqbal, M. (2020). 2D conceptual model on Natar geothermal system based on gravity data. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 15(1), 39–49. DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v15i1.292>
- Karous, M., & Hjelt, S. E. (1983). Linear filtering of VLF dip angle measurements. *Geophysical Prospecting*, 31(4), 782–794. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x>
- Leborgne, R., Rivett, M. O., Wanangwa, G., Sentenac, P., & Kalin, R. M. (2021). True 2-D resistivity imaging from vertical electrical soundings to support more sustainable rural water supply borehole siting in Malawi. *Applied Sciences*, 11(3), 1162. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031162>
- Lin, M. J., & Jeng, Y. (2010). Application of the VLF-EM method with EEMD to the study of a mud volcano in southern Taiwan. *Geomorphology*, 119(1–2), 97–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.021>
- Mangga, S. A., Atmawinata, S., Hermanto, B., Setyogroho, B., & Amin, T. C. (1993). *Peta geologi lembar Tanjungkarang, skala 1:250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Marwan, M., Isa, M., Idroes, R., Nursyafira, N., Idris, S., Yanis, M., Ghani, A. A., & Paembonan, A. Y. (2023). Geoelectrical model of geothermal spring in Ie Jue Seulawah deriving from 2D VLF-EM and DC resistivity methods. *Journal of Applied Engineering Science*, 21(1), 59–69. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-38014>
- Okpoli, C. C. (2013). Sensitivity and resolution capacity of electrode configurations. *International Journal of Geophysics*, 2013, Article ID 608037. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/608037>
- Oloani, O. A. (2022). *Analisa perbandingan konfigurasi Wenner-Alpha dan Wenner-Schlumberger dengan metode geolistrik resistivitas* (Skripsi sarjana, Institut Teknologi Sumatera, tidak dipublikasikan).
- Özürlan, G., & Sahin, M. H. (2006). Integrated geophysical investigations in the Hisar geothermal field, Demirci, Western Turkey. *Geothermics*, 35(2), 110–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.11.004>
- Putri, U. A., Paembonan, A. Y., Antosia, R. M., & Irawati, S. M. (2024). Analisis metode geolistrik 2D dan VLF-EM untuk mendeteksi jalur air panas Desa Jatimulyo, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 7(1), 9–18. DOI: <https://doi.org/10.14710/jgt.7.1.2024.9-18>
- Rizka, & Setiawan, S. (2019). Investigasi lapisan akuifer berdasarkan data vertical electrical sounding (VES) dan data electrical logging: Studi kasus Kampus ITERA. *Bulletin of Scientific Contribution: Geology*, 17(2), 91–100. DOI: <https://doi.org/10.24198/bsc.v17i2.22393>
- Suharno, Aritonang, R. B., Zainudin, A., & Rustadi. (2012). *Sistem panas bumi Cisarua Natar, Lampung Selatan*. Paper presented at *The 12th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference*, Bandung.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Geophysical methods for subsurface site characterization*. EPA/540/R-06/003. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response. DOI: <https://clu-in.org/download/char/char-epa-geophysics.pdf>