Vol 7 No 1 Tahun 2025 E-ISSN: 2715-9469

INVERSI 1D DATA VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING DENGAN VARIASI STRUKTUR RESISTIVITAS BATUAN

Dian Darisma[1*], Zakia Masrurah[1], Amir Asyqari[2], Tarmizi[1], Amsir[1], Rifa Salma Salsabila[1], Nurul Azmi[3]
[1]Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
[2]Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala
[3]Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan Ilmu Pendidikan, Universitas Abulyatama
[*]Email : diandarisma@usk.ac.id
(Received: April 2025 / Revised: April 2025 / Accepted: April 2025)

ABSTRAK

Penelitian ini menginvestigasi efektivitas inversi 1D data resistivitas *vertical electrical sounding* (VES) menggunakan algoritma *Singular Value Decomposition* (SVD) pada model sintetik dengan tiga lapisan. Akurasi dan sensitivitas variasi struktur resistivitas program yang dikembangkan kemudian diuji pada empat tipe model resistivitas yang berbeda yaitu tipe H, A, K, dan Q dengan tebal lapisan yang seragam yaitu 10m untuk lapisan pertama dan 20m untuk lapisan kedua. Data sintetik untuk keempat model tersebut ditambahkan noise sebesar 10% untuk mendekati kondisi bawah permukaan yang sebenarnya dan dibandingkan dengan data sintetik tanpa noise. Hasil inversi yang diterapkan pada data tanpa noise menunjukkan hasil yang mendekati model sebenarnya dengan *root mean square error* (RMSE) yang mendekati nol. Sedangkan pada data sintetik dengan tambahan *noise* 10% menunjukkan hasil yang mendekati model yang sebenarnya dengan RMSE yang bervariasi antara 1.9 dan 5.2. Hasil inversi pada model tipe H dan tipe K lebih baik dibandingkan dengan model tipe A dan Q. Hal ini dikarenakan model tipe H dan K memiliki lapisan kedua yang kontras dengan lapisan pertama dan kedua. Sedangkan model tipe A dan Q memiliki lapisan yang cenderung tidak kontras atau lebih *smooth*. Kondisi ini meningkatkan ketajaman perbedaan data apparent resistivitas pada model tipe H dan K, sehingga algoritma SVD dapat mengenali dan menyesuaikan model dengan lebih presisi. Hasil penelitian ini dapat menjadi panduan dalam interpretasi awal data VES yang dapat diaplikasikan pada studi air tanah dan studi geofisika lainnya.

Kata Kunci: *inversi, 1D, resistivitas, VES, SVD.*

1. PENDAHULUAN

Metode geolistrik telah banyak digunakan dalam eksplorasi geofisika untuk mengkarakterisasi struktur bawah permukaan dengan mengukur variasi resistivitas bawah permukaan [1], [2]. Metode geolistrik digunakan untuk berbagai macam kajian seperti dalam bidang hidrogeologi, lingkungan dan masalah teknis lainnya [3]–[5]. Salah satu pendekatan dalam survei geolistrik yang sering digunakan yaitu *vertical electrical sounding* (VES) yang memiliki penetrasi yang dalam.

Data resistivitas semu yg terukur, dalam proses pengolahan data 1D VES diinversikan untuk memperoleh distribusi resistivitas bawah permukaan. Data tersebut kemudian diinversikan untuk diinterpretasikan secara kuantitatif berdasarkan model 3 lapisan resistivitas yang dikategorikan sebagai model tipe H, A, K, dan Q [6], yang memiliki karakteristik lapisan dengan nilai resistivitas yang berbeda. Model tipe H memiliki lapisan konduktif diantara dua lapisan yang lebih resistif ($\rho 1 > \rho 2 < \rho 3$). Sedangkan model tipe K merupakan kebalikan dari model H dimana lapisan resistif berada diantara dua lapisan yang konduktif ($\rho 1 < \rho 2 > \rho 3$. Model tipe A memiliki lapisan dengan nilai resistivitas yang meningkat dengan kedalaman ($\rho 1 < \rho 2 < \rho 3$ sedangkan model tipe Q resistif di lapisan pertama, dan konduktif di lapisan kedua dan lebih konduktif di lapisan ketiga ($\rho 1 > \rho 2$ dan $\rho 2 < \rho 3$).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan interpretasi kualitatif keempat model tersebut pada 1D resistivitas data dapat membantu memecahkan masalah ambiguitas pada model tersebut [7], [8]. Sebagai contoh, algoritma global optimization dan levenberg-marquadt yang diaplikasikan pada keempat model tersebut menunjukkan model dengan tipe K umumnya lebih mudah dan akurat untuk diinterpretasikan dibandingkan dengan model tipe A akibat dari faktor ambiguitas yang lebih tinggi [9], [10]. Selain itu, pendekatan menggunakan *machine learning* seperti *neural network* menunjukkan hasil yang baik dalam mengestimasi resistivitas dan ketebalan lapisan bawah permukaan bahkan dalam kondisi data dengan *noise* tinggi [11]. Penelitian tersebut menunjukkan hasil inversi berdasarkan pemahaman dari keempat tipe model resistivitas dapat membantu optimalisasi hasil inversi dalam penentuan model awal resistivitas.

Pendekatan lainnya yang dapat digunakan untuk inversi data 1D VES yaitu menggunakan Singular Value Decomposition (SVD) [12]. Algoritma ini dapat menyelesaikan permasalahan *ill-posed* yang sering dihadapi dalam proses inversi data geofisika akibat dari banyak kemungkinan solusi model [13]. Selain itu, algoritma SVD menjadi pilihan utama dalam proses inversi dikarenakan waktu komputasi yang minim namun tetap dapat memberikan hasil inversi yang sangat baik. Selain itu, algoritma SVD juga sangat baik untuk inversi data dengan noise tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menginverstigasi kemampuan algoritma SVD dalam proses inversi 1D data VES berdasarkan

berbagai variasi struktur resistivitas (model tipe H, A, K, dan Q). Melalui penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan dalam interpretasi awal data 1D VES dan menjelaskan kelebihan dan kekurangan karakteristik keempat model resistivitas batuan. Umumnya, inversi data sintetik atau data lapangan mewakili model Q yang bersifat *smooth* tidak terjelaskan dengan baik dibandingkan dengan model H, A, dan K. Oleh karena itu penelitian ini bermaksud membandingkan kelebihan inversi data 1D VES menggunakan SVD untuk setiap model H, A, K, dan Q dengan menggunakan data sintetik tanpa noise dan dengan noise 10%.

2. METODE PENELITIAN

Inversi 1D data VES menghasilkan model resistivitas dan ketebalan lapisan dari pengukuran nilai resistivitas semu di lapangan. Proses inversi menggunakan algoritma SVD untuk mendapatkan hasil inversi yang mendekati model bawah permukaan. Secara umum proses inversi mengikuti beberapa tahapan berikut: pemodelan kedepan, perhitungan matriks Jacobian, inversi menggunakan SVD, dan *update* parameter model hingga data dan respon model memiliki error sesuai yang diharapkan (Gambar 1).

Proses pemodelan kedepan menghitung resistivitas semu (ρa) berdasarkan model awal yang ditentukan mengunakan konfigurasi Slumberger [14]. Resistivitas semu dihitung berdasarkan fungsi dari jarak antar elektroda dan struktur resistivitas bawah permukaan mengikuti Persamaan (1) berikut [15], [16],

$$\rho a = s^2 \int_0^\infty T(\lambda) J_1(\lambda s) \lambda d\lambda, \quad (1)$$

dimana:
s^2 = setengah jarak elektroda arus dalam konfigurasi Slumberger,
J_1 = order pertama fungsi Bessel,
$T(\lambda)$ = fungsi transform berdasarkan resistivitas dan ketebalan tiap lapisan,
λ = variable integral.

Resistivitas semu yang didapatkan dari proses pemodelan kedepan kemudian digunakan untuk proses inversi yang dibandingkan dengan data pengukuran di lapangan, dalam hal ini tiap tipe model (Tabel 1). Proses inversi bertujuan untuk menemukan vektor model m berdasarkan selisih minimum resistivitas semu model (*calculated*) dan data lapangan (*observed*). Permasalahan inversi diselesaikan menggunakan Persamaan (2) berikut,

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{G}\boldsymbol{m}, \quad (2)$$

dimana:
$\boldsymbol{d}$ = data (resistivitas semu),
$\boldsymbol{G}$ = Matriks Jacobian,
$\boldsymbol{m}$ = model (resistivitas dan ketebalan).

Solusi inversi menggunakan SVD mengikuti Persamaan (3) berikut [16],

$$\boldsymbol{m^{k+1}} = \boldsymbol{m^k} + \boldsymbol{V} diag\left(\frac{\mu_j}{\mu_j^2+\varepsilon^2}\right)\boldsymbol{U}^T[-\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m}^k)] \quad (3)$$

dimana:
$\boldsymbol{V}$ = vektor eigen dari parameter model,
$\boldsymbol{U}$ = vektor eigen dari parameter data,
ε = faktor peredam,
$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{m})$ = selisih antara model dan hasil perhitungan.

Selisih antara data dan hasil perhitungan *root mean square error* (RMSE) diperoleh menggunakan Persamaan (4),

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(d_i - G(\boldsymbol{m})_i)^2} \quad (4)$$

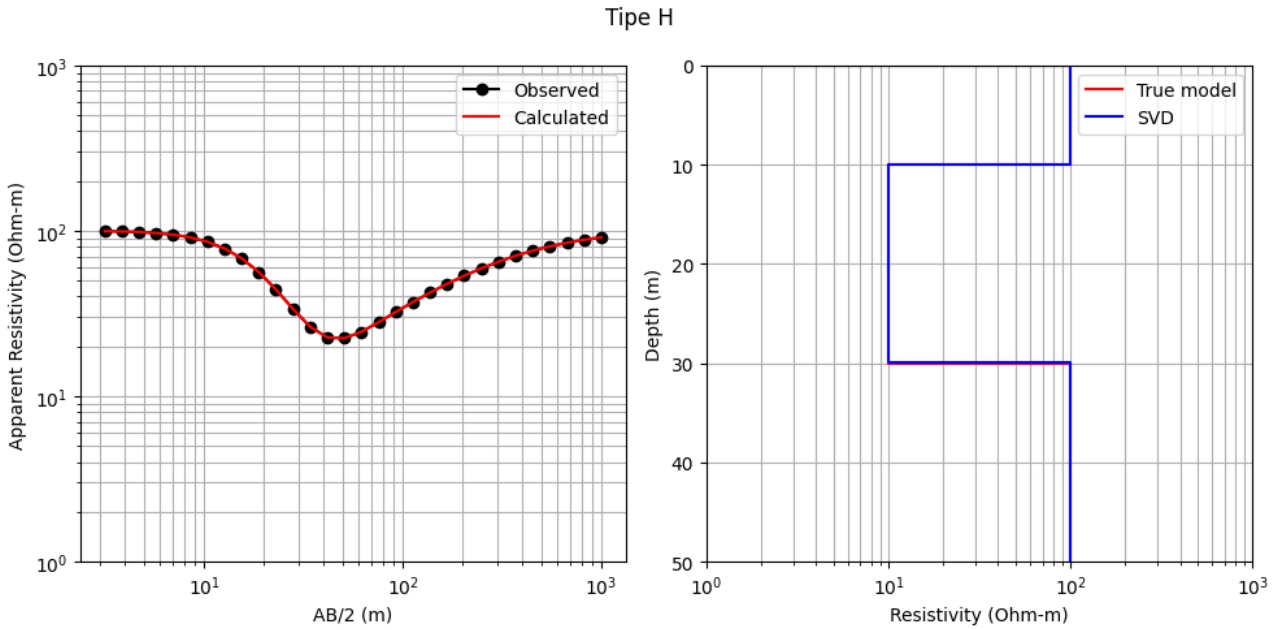
Tabel 1. Deskripsi model resistivitas lapisan pertama ($\rho 1$), lapisan kedua ($\rho 2$) dan lapisan ketiga ($\rho 3$) untuk tiap lapisan dan ketebalan (t) yang digunakan untuk menghasilkan data sintetik

Tipe Model	Model Resistivitas (Ωm)			Ketebalan lapisan (m)	
	$\rho 1$	$\rho 2$	$\rho 3$	t1	t2
Tipe H	100	10	100	10	20
Tipe A	10	50	100	10	20
Tipe K	10	100	10	10	20
Tipe Q	100	10	50	10	20

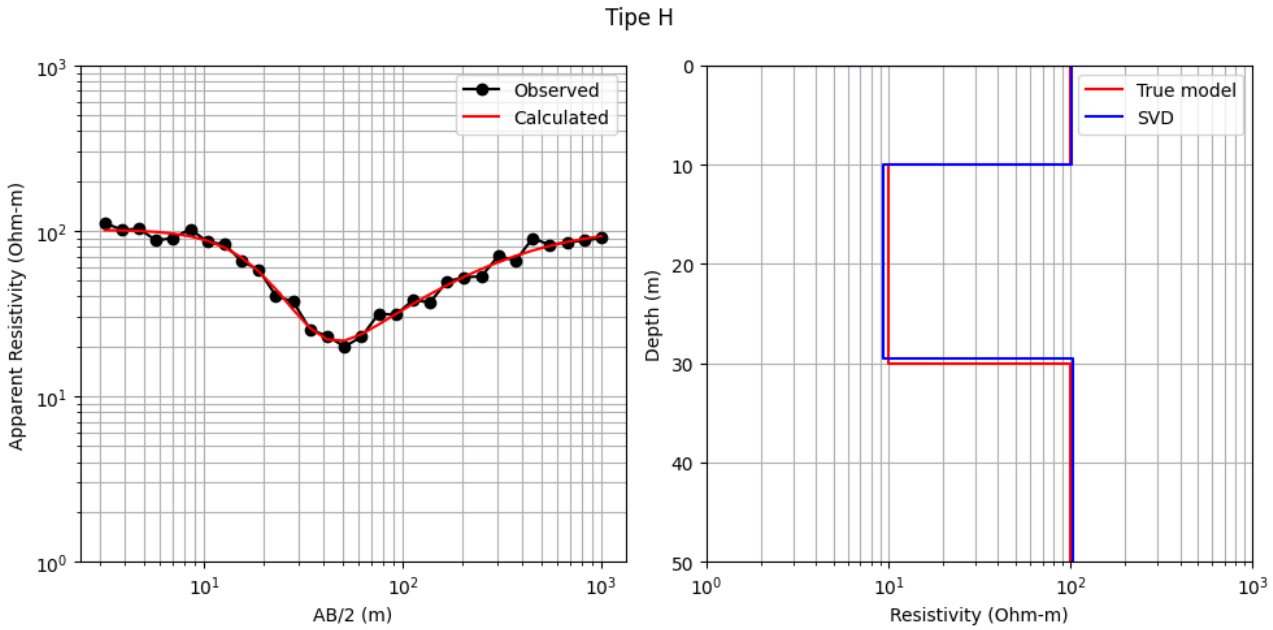
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil inversi 1D data VES menggunakan algoritma SVD yang diaplikasikan pada empat jenis model resisitivitas (Tabel 1) dengan ketebalan lapisan yang seragam yaitu 10 m dan 20 m untuk lapisan pertama dan kedua secara berurutan. Gambar 2, Gambar 4, Gambar 6, dan Gambar 8 merupakan hasil inversi data sintetik tanpa *noise*. Sedangkan Gambar 3, Gambar 5, Gambar 7, dan Gambar 9 merupakan hasil inversi data sintetik dengan noise 10%.

Gambar 2 dan Gambar 3 merupakan hasil inversi data sintetik data tanpa noise dan data *noise* 10% untuk model tipe H dengan karakteristik lapisan kedua berupa nilai yang lebih konduktif dibandingkan lapisan pertama dan ketiga. Model tipe H memiliki nilai resistivitas sebesar 100 Ωm, 10 Ωm, dan 100 Ωm untuk masing-masing lapisan pertama, kedua dan ketiga. Hasil inversi model tipe H dengan *noise* 10% masih mendekati model yang sebenarnya dengan RMSE sebesar 5.1 (Gambar 3).

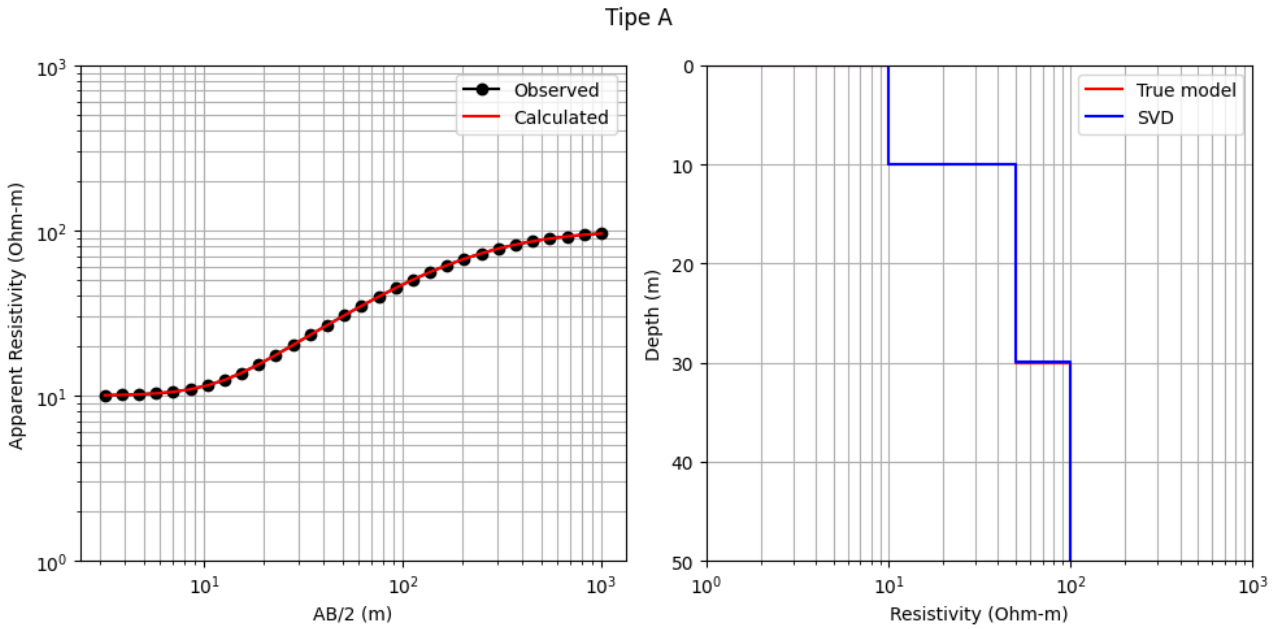


Gambar 2. Hasil inversi model tipe H tanpa noise

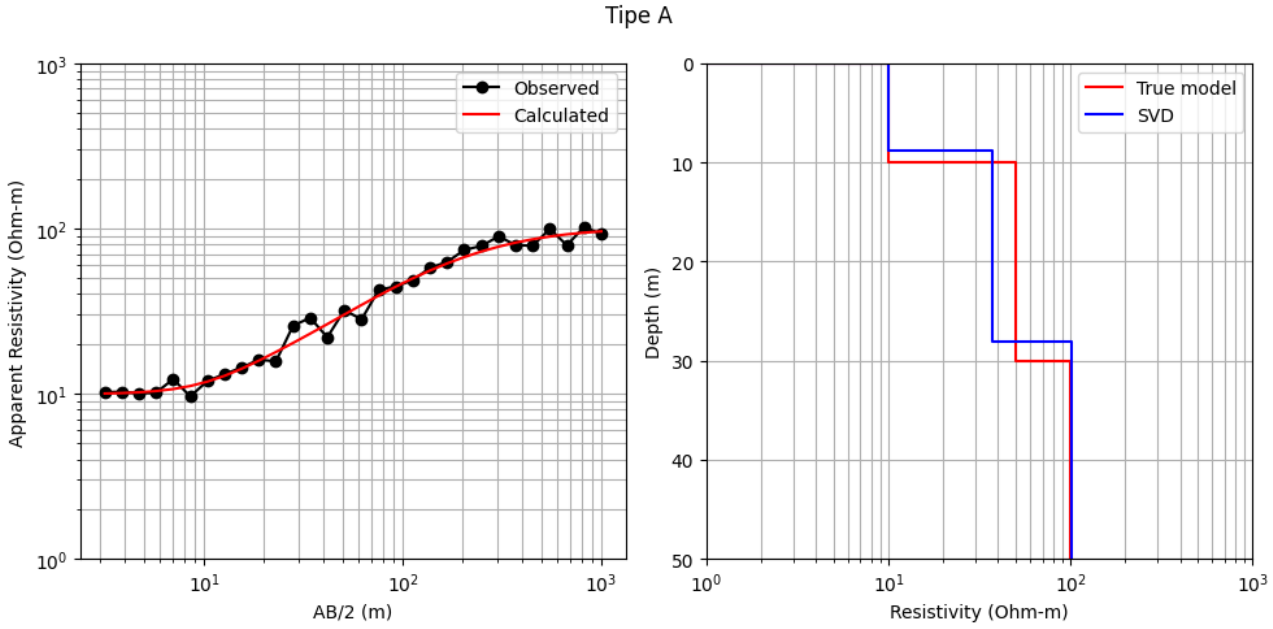


Gambar 3. Hasil inversi model tipe H dengan noise 10%

Gambar 4 dan Gambar 5 merupakan hasil inversi data sintetik data tanpa *noise* dan data *noise* 10% untuk model tipe A dengan karakteristik resistivitas batuan semakin meningkat dengan kedalaman. Model tipe A memiliki nilai resistivitas sebesar 10 Ωm, 50 Ωm, dan 100 Ωm. Hasil inversi model tipe A dengan *noise* 10% masih mendekati model yang sebenarnya dengan RMSE sebesar 5.2 (Gambar 5).



Gambar 4. Hasil inversi model tipe A tanpa noise

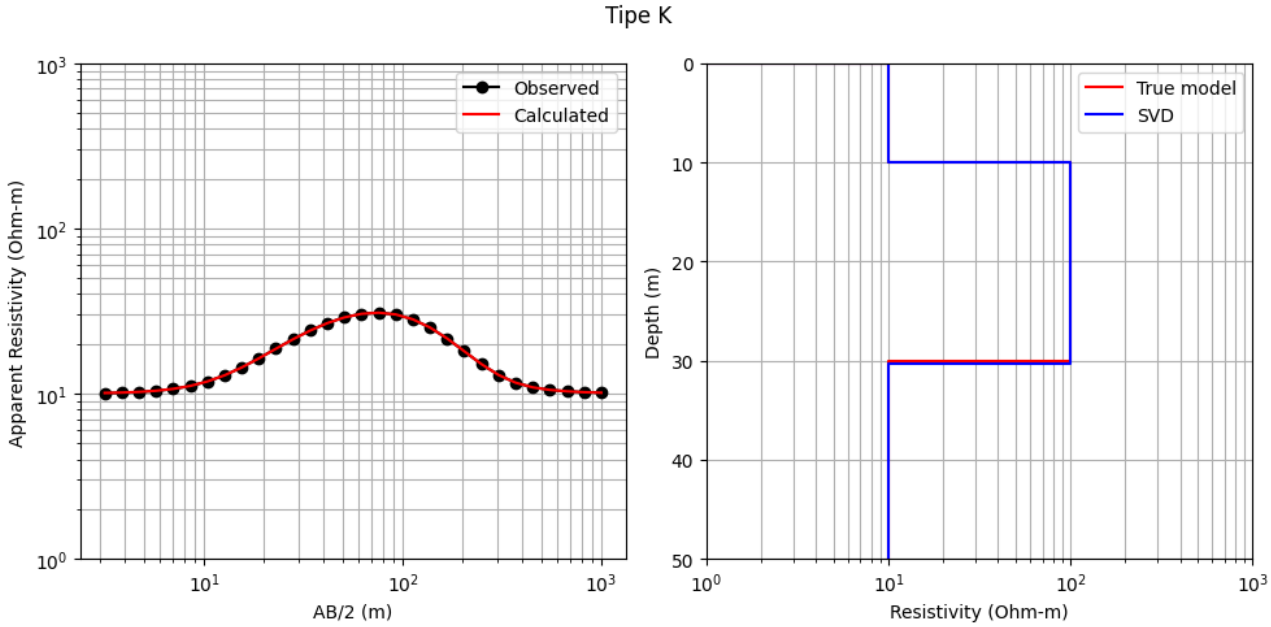


Gambar 5. Hasil inversi model tipe A dengan noise 10%

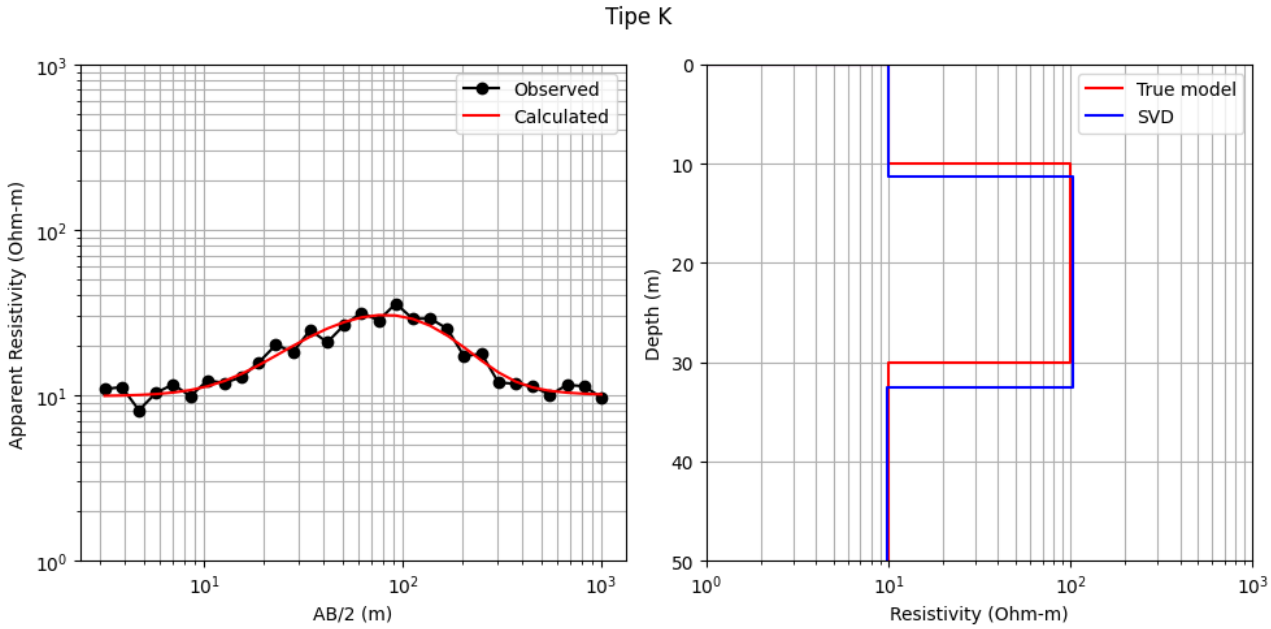
Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan hasil inversi data sintetik data tanpa noise dan data *noise* 10% untuk model tipe K dengan karakteristik lapisan kedua dengan nilai yang lebih resistif dibandingkan lapisan pertama dan ketiga. Model tipe K memiliki nilai resistivitas sebesar 10 Ωm, 100 Ωm, dan 10 Ωm untuk masing-masing lapisan pertama, kedua dan ketiga. Hasil inversi model tipe K dengan *noise* 10% masih mendekati model yang sebenarnya dengan RMSE sebesar 1.9 (Gambar 7). RMSE tersebut merupakan RMSE yang terkecil jika dibandingkan dengan RMSE pada kasus inversi model tipe H, A, dan Q (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil inversi resistivitas (ρ) tiap lapisan dan ketebalan (t) dengan data noise 10%

Tipe Model	Resistivititas perhitungan (Ωm)			Ketebalan lapisan (m)		RMSE
	ρ1	ρ2	ρ3	t1	t2	
Tipe H	100	10	96	10.3	27.9	5.1
Tipe A	10	48	99	8.5	18	5.2
Tipe K	10	100.2	9.8	11.5	22	1.9
Tipe Q	101	10.2	51	10.5	16	4.4



Gambar 6. Hasil inversi model tipe K tanpa noise

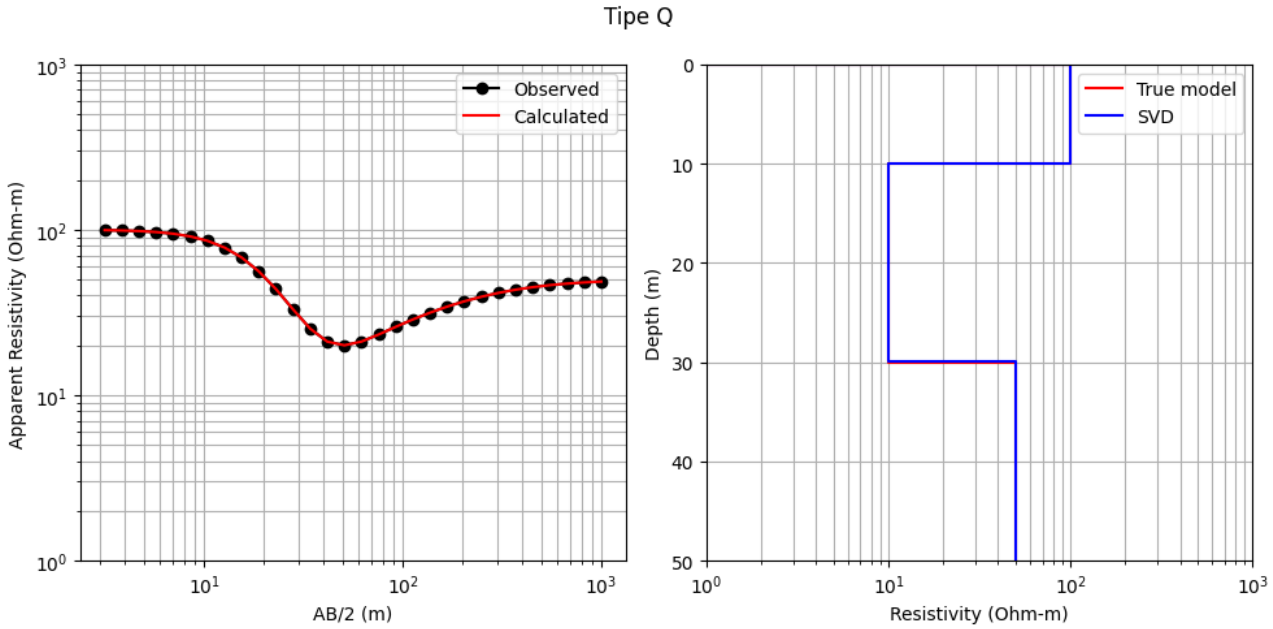


Gambar 7. Hasil inversi model tipe K dengan noise 10%

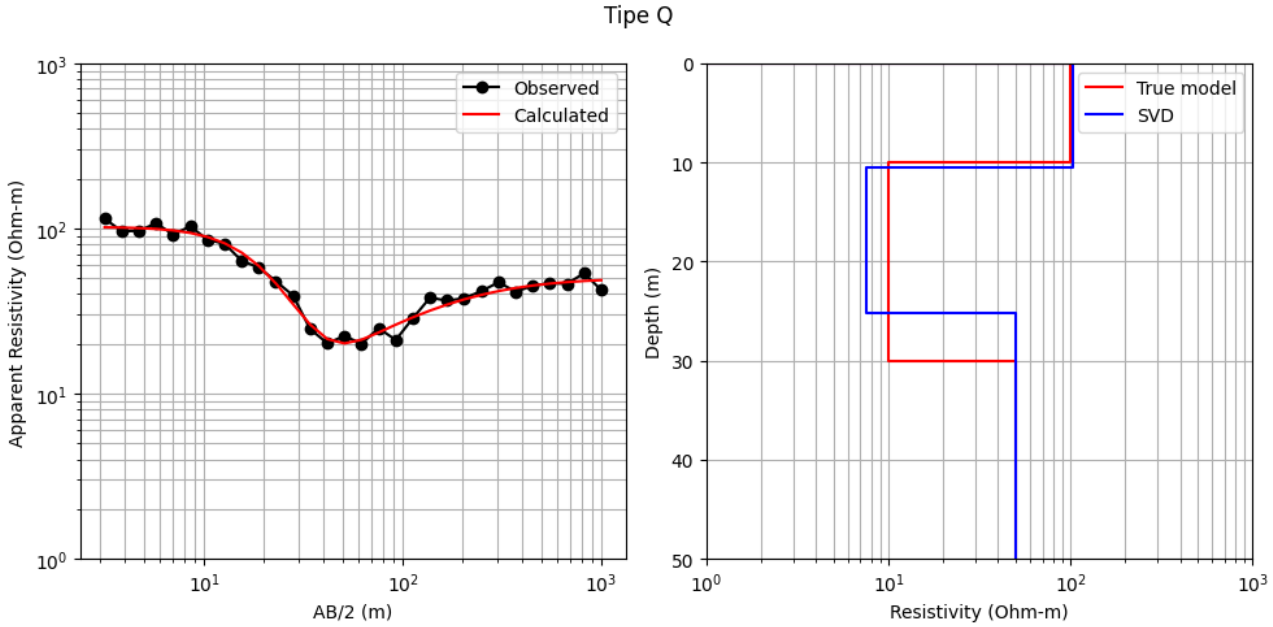
Gambar 8 dan Gambar 9 merupakan hasil inversi data sintetik data tanpa noise dan data *noise* 10% untuk model tipe Q dengan karakteristik resistivitas batuan paling resistif di lapisan pertama, paling resistif di lapisan kedua, dan moderat di lapisan ketiga. Model tipe Q memiliki nilai resistivitas sebesar 100 Ωm, 10 Ωm, dan 50 Ωm. Hasil inversi model tipe Q dengan *noise* 10% masih mendekati model yang sebenarnya dengan RMSE sebesar 5.2 (Gambar 5).

Hasil inversi untuk tipe model H, A, K, dan Q sama dengan model yang sebenarnya dengan RMSE sebesar 0. Hasil inversi data sintetik dengan *noise* 10% juga sangat baik dengan RMSE antara 1.9 dan 5.2 (Tabel 2) [16]. Estimasi model resistivitas dan ketebalan lapisan pada kasus data sintetik dengan noise 10% juga sangat baik yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Hasil inversi pada model tipe H dan tipe K lebih baik dibandingkan pada model tipe A dan Q dalam estimasi model resistivitas terhadap kedalaman. Hal ini dikarenakan model tipe H dan K memiliki lapisan kedua yang kontras dengan lapisan pertama dan kedua. Hal ini mengakibatkan data *appaarent* resistivitas untuk model tipe H dan K lebih terlihat kontras sehingga algoritma SVD dapat mengenali dan menyesuaikan model dengan lebih akurat. Sedangkan model tipe A dan Q memiliki lapisan yang cenderung tidak kontras atau lebih *smooth* sehingga ambiguitas dalam estimasi model resistivitas lebih tinggi. Perbedaan kontras yang signikan untuk tiap lapisan juga mempengaruhi hasil inversi data 1D VES. Estimasi model resistivitas dan kedalaman untuk lapisan pertama menunjukkan hasil yang sangat baik untuk seluruh tipe model H, A, K, dan Q. Selanjutnya untuk estimasi lapisan kedua, inversi dengan model tipe H dan K memberikan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan model tipe A dan Q. Namun model tipe A dan Q lebih konsisten dalam estimasi lapisan ketiga.

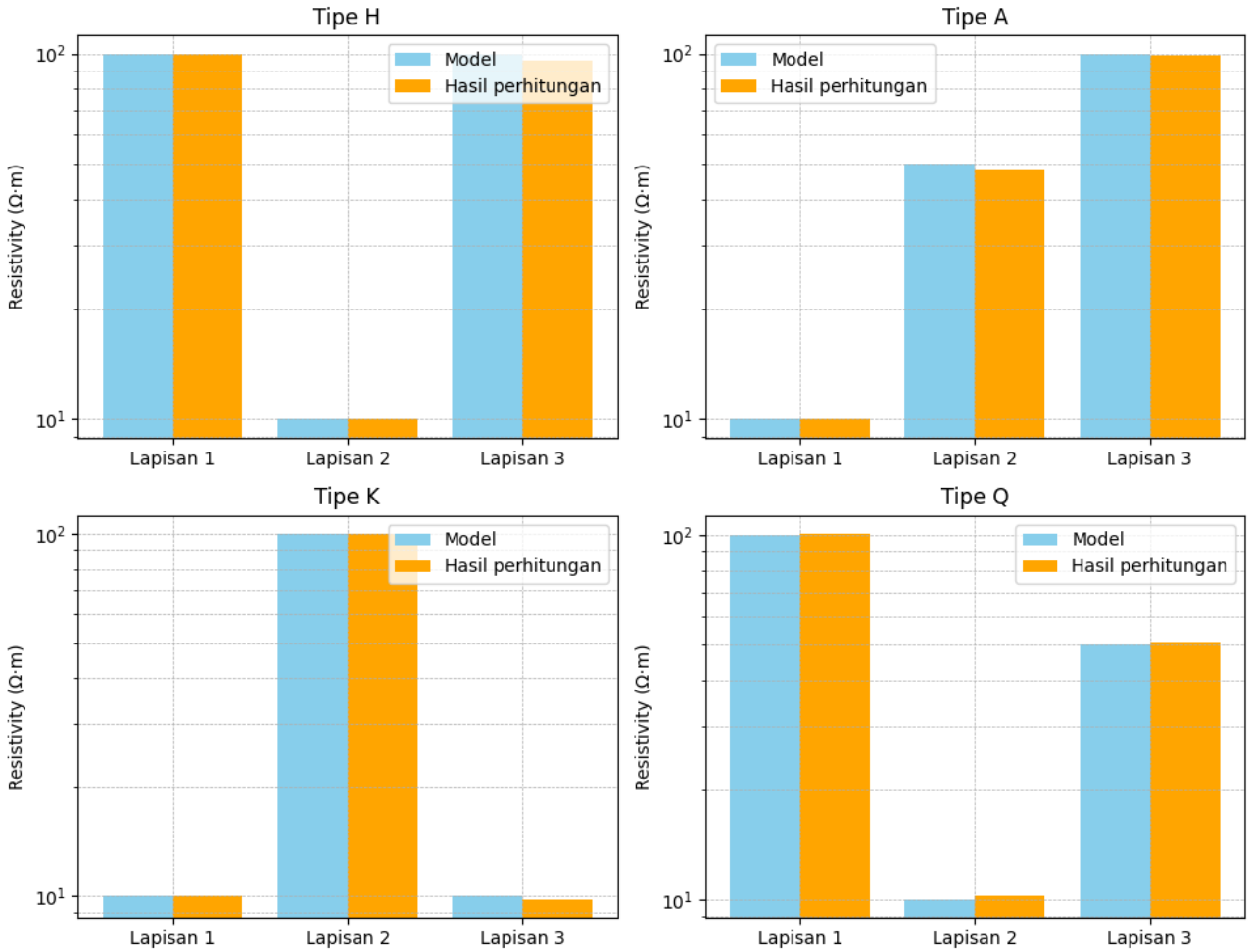


Gambar 8. Hasil inversi model tipe Q tanpa noise



Gambar 9. Hasil inversi model tipe Q dengan noise 10%

Hasil penelitian menunjukkan bahwa inversi menggunakan algoritma SVD untuk keempat model resistivitas sangat baik digunakan untuk diaplikasikan pada data 1D VES. Selain itu, pemahaman mengenai empat model dasar struktur resistivitas tipe H, A, K, dan Q dapat membantu dalam interpretasi kualitatif dalam penentuan model awal inversi. Namun inversi data lapangan dapat menjadi tantangan dalam mendapatkan model yang sebenarnya dikarenakan berbagai macam faktor seperti resistivitas batuan yang heterogen dengan berbagai macam kondisi lingkungan dan data dengan *noise* yang tinggi [17], [18].



Gambar 10. Perbandingan hasil inversi berupa resistivitas dan ketebalan lapisan berdasarkan data dengan noise 10%

4. KESIMPULAN

Hasil inversi data 1D VES menggunakan algoritma SVD dengan model tipe H, A, K, dan Q menunjukkan hasil yang mendekati model yang sebenarnya. Akurasi dari hasil pemodelan dan inversi menunjukkan hasil yang tergantung pada struktur resistivitas bawah permukaan. Inversi menggunakan model tanpa noise memberikan hasil inversi yang sama dengan model data. Sedangkan inversi menggunakan model dengan *noise* 10% memberikan hasil yang juga mendekati model aslinya dengan RMSE yang bervariasi antara 1.9 dan 5.2. Inversi dengan model tipe H dan K memberikan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan model tipe A dan Q. Hal ini disebabkan oleh kontras densitas di lapisan kedua jika dibandingkan dengan lapisan pertama dan kedua. Sedangkan model tipe A memiliki nilai resistivitas yang tidak terlalu kontras untuk setiap lapisan, sama halnya dengan model tipe Q yang tidak terlalu kontras pada lapisan kedua dan ketiga. Kontras densitas pada tiap lapisan memberikan respon resistivitas semu yang kontras yang dapat meningkatkan hasil estimasi model resistivitas terhadap kedalaman. Secara keseluruhan, inversi 1D data VES menggunakan algoritma SVD memberikan hasil yang sangat baik yang ditunjukkan oleh estimasi resisitivitas batuan per lapisan yang mendekati aslinya.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Amsir, Y. Marvita, Z. Masrurah, and D. Gunarsih, "Pendugaan Sebaran Intrusi Air Laut di Desa Jeulingke Menggunakan Metode 2D Resistivitas," *Phi: Jurnal Pendidikan Fisika dan Terapan*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2023, doi: 10.22373/p-jpft.v9i1.17523.

[2] S. Idris, D. Darisma, A. H. Pramana, N. Aflah, M. Sayuti, and N. Novita, "Identification of the Aquifer Layer using the Geoelectric Method in Teupin Batee Village, Aceh Besar," *Bulletin of Computer Science and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2022, doi: 10.25008/bcsee.v3i1.1155.

[3] T. Tarmizi, "APLIKASI METODE GEOLISTRIK UNTUK STUDI LONGSOR DI LOKOP ACEH TIMUR," *JURNAL HADRON*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Sep. 2022, doi: 10.33059/jh.v4i1.5854.

[4] Z. Masrurah, R. Annisa, Amsir, Wahidah, and N. A. Harun, "Identification of Groundwater Potential Zone Existence in GAR Housing Using Electrical Resistivity Method," *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, vol. 6, no. 02, pp. 135–146, Aug. 2024, doi: 10.56099/jrgi.v6i02.94.

[5] D. Darisma, F. Fernanda, and M. Syukri, "Investigation of Groundwater Potential using Electrical Resistivity Method and Hydraulic Parameters in Lam Apeng, Aceh Besar, Indonesia.," *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 185–190, Dec. 2020, doi: 10.25299/jgeet.2020.5.4.5501.

[6] J. M. Reynolds, *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, 2011.

[7] S. R. Mashhadi, H. Ramazi, and M. Asgarpour Shahreza, "Assessing the effects of 1D assumption violation in vertical electrical sounding (VES) data processing and interpretation," *Acta Geophysica*, vol. 68, no. 1, pp. 105–122, 2020.

[8] D. N. Leite *et al.*, "Geoelectrical characterization with 1D VES/TDEM joint inversion in Urupês-SP region, Paraná Basin: Applications to hydrogeology," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 151, pp. 205–220, 2018.

[9] S. P. Sharma and P. Kaikkonen, "Appraisal of equivalence and suppression problems in 1D EM and DC measurements using global optimization and joint inversion," *Geophysical Prospecting*, vol. 47, no. 2, pp. 219–249, Mar. 1999, doi: 10.1046/j.1365-2478.1999.00121.x.

[10] D. Darisma and Marwan, "One-dimensional magnetotelluric inversion using levenberg-marquardt and particle swarm optimization algorithm," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 364, no. 1, p. 012035, Nov. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/364/1/012035.

[11] A. P. Singh, D. Vashisth, and S. Srivastava, "A deep learning approach for joint inversion of DC Resistivity and MT data," presented at the 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, Oct. 2021, pp. 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.202113268.

[12] A. Falini, "A review on the selection criteria for the truncated SVD in Data Science applications," *Journal of Computational Mathematics and Data Science*, vol. 5, p. 100064, 2022.

[13] K. Ji, Y. Shen, Q. Chen, B. Li, and W. Wang, "An adaptive regularized solution to inverse ill-posed models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1–15, 2022.

[14] S. Bhatnagar, A. K. Taloor, S. Roy, and P. Bhattacharya, "Delineation of aquifers favorable for groundwater development using Schlumberger configuration resistivity survey techniques in Rajouri district of Jammu and Kashmir, India," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 17, p. 100764, 2022.

[15] O. KOEFOED, "A FAST METHOD FOR DETERMINING THE LAYER DISTRIBUTION FROM THE RAISED KERNEL FUNCTION IN GEOELEGTRICAL SOUNDING," *Geophysical Prospecting*, vol. 18, no. 4, pp. 564–570, Dec. 1970, doi: 10.1111/j.1365-2478.1970.tb02129.x.

[16] Y. L. Ekinci and A. Demirci, "A Damped Least-Squares Inversion Program for the Interpretation of Schlumberger Sounding Curves," *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, pp. 4070–4078, Dec. 2008, doi: 10.3923/jas.2008.4070.4078.

[17] H. Khatimah *et al.*, "Electrical Resistivity Tomography (ERT) for investigating subsurface structures in the karst area of the Ek Leuntie Cave, Aceh Province," *Journal of Aceh Physics Society*, vol. 12, pp. 6–12, Feb. 2024, doi: 10.24815/jacps.v12i4.35860.

[18] N. Ismail, M. Yanis, and A. Asyqari, "The use of magnetic and geoelectrical methods to locate buried ancient artificial canals and wells around the cultural heritage of Indrapatra Fort, Aceh, Indonesia," *Geosciences Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 67–76, 2023.