

Pemodelan Inversi Data Vertical Electrical Sounding (VES) Menggunakan Hybrid Differensial Evolution Flower Pollination Algorithm (HDEFPA)

Vertical Electrical Sounding (Ves) Data Inversion Modeling Using Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm (HDEFPA)

Liora Chrissa Pattiasina^{1*}, Warsa², Samsul Bahri¹

¹Program Studi Teknik Geofisika Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka Ambon

²Program Studi Teknik Geofisika Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha, No.10 Bandung

*chrissaliora07@gmail.com

Diterima: 16 Juli 2024; Disetujui: 2 November 2024

DOI: [10.30598/tanahgoyang.2.2.108-121](https://doi.org/10.30598/tanahgoyang.2.2.108-121)

Kata Kunci:	Abstrak
Geolistrik Vertical Electrical Sounding Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm Flower Pollination Algorithm Differential Evolution	Geolistrik Resistivitas adalah metode geofisika untuk memetakan resistivitas bawah permukaan. Vertical Electrical Sounding (VES) sering digunakan karena kesederhanaannya dalam memberikan informasi distribusi litologi vertikal. Pemodelan inversi data VES merupakan tantangan kompleks akibat hubungan non-linier antara data dan parameter model. Penelitian ini menggunakan Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm (HDEFPA) sebagai metode optimasi global untuk mengatasi masalah ini. HDEFPA menggabungkan algoritma Flower Pollination (FPA) dan Differential Evolution (DE), yang memiliki kemampuan pencarian global dan lokal. Pengujian dilakukan dengan data VES sintetik pada model bumi dua lapis, tiga lapis (tipe-K dan tipe-H), dan empat lapis. Selain itu, digunakan data lapangan dari intrusi air laut di Pelauw, Maluku, Indonesia. Hasil menunjukkan bahwa HDEFPA lebih unggul dibandingkan FPA dan DE tunggal dalam konvergensi cepat dan iterasi lebih sedikit. Algoritma HDEFPA berhasil memvalidasi data lapangan, menghasilkan hasil yang andal dan akurat. Penelitian ini memberikan wawasan tentang keunggulan metode optimasi global dibandingkan metode inversi lokal dalam pemodelan inversi data VES.
Keywords:	Abstract
Geoelectric Vertical Electrical Sounding Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm Flower Pollination Algorithm Differential Evolution	<i>Geoelectric Resistivity is a geophysical method for mapping subsurface resistivity. Vertical Electrical Sounding (VES) is often used because of its ease in providing information on vertical lithological distribution. Modeling inversion of VES data is a complex challenge due to the non-linear relationship between data and model parameters. This research uses the Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm (HDEFPA) as a global optimization method to overcome this problem. HDEFPA combines Flower Pollination (FPA) and Differential Evolution (DE) algorithms, which have both global and local search capabilities. Tests were carried out with synthetic VES data on two-layer, three-layer (K-type and H-type), and four-layer earth models. In addition, field data from seawater intrusion in Pelauw, Maluku, Indonesia were used. The results show that HDEFPA is superior to FPA and single DE in fast convergence and fewer iterations. The HDEFPA algorithm successfully validates field data, producing reliable and accurate results. This research provides insight into the advantages of global optimization methods over local inversion methods in inversion modeling of VES data.</i>

1. PENDAHULUAN

Geolistrik Resistivitas merupakan salah satu metode geofisika untuk melihat distribusi resistivitas bawah permukaan. Pemancar mengirimkan arus searah bertegangan tinggi ke dalam bumi menggunakan dua elektroda, kemudian dua elektroda lainnya mengukur respons tegangan yang diberikan oleh bumi. Teknik pengukuran resistivitas listrik dibagi menjadi *vertical electrical sounding* (VES) dan *electrical resistivity tomography* (ERT). VES merupakan teknik yang banyak digunakan di lapangan karena sederhana, cepat, dan mampu memberikan informasi yang baik mengenai distribusi litologi secara vertikal atau satu dimensi (1D). Banyak aplikasi VES dilakukan untuk eksplorasi geofisika dekat permukaan seperti identifikasi akuifer air tanah (Abdel Zaher dkk., 2021; Alarifi dkk., 2022; Arunbose dkk., 2021; Bahri dkk., 2023; Mahmud dkk., 2022), pemantauan intrusi air laut (Ammar dkk., 2021; Asare dkk., 2022; Folorunso, 2021; Kazakis dkk., 2016), identifikasi struktur, dan banyak lainnya.

Pemodelan inversi data VES adalah masalah yang relatif kompleks karena hubungan antara data dan parameter model bersifat sangat non-linier. Parameter model terdiri dari resistivitas setiap lapisan dan ketebalannya. Metode optimasi global sering digunakan sebagai pengganti metode konvensional karena mereka dapat menghindari perangkap solusi lokal dan sensitif terhadap pemilihan model awal (Grandis dan Sungkono, 2022). Algoritma metaheuristik berbasis alam adalah salah satu jenis optimasi global yang direkomendasikan (Yang dan Karamanoglu, 2020). Dalam perkembangannya, penggunaan algoritma berbasis alam menarik perhatian peneliti untuk dapat memecahkan masalah kompleks di bidang rekayasa dan merambah ke bidang pemodelan terbalik geofisika (Junian dan Grandis, 2023). Penerapan algoritma yang terinspirasi alam dalam inversi geofisika termasuk *Particle Swarm Optimization* (Cui dkk., 2020; Hapsoro dkk., 2021; Kaplanvural dkk., 2020; Oyeyemi dkk., 2023), *Simulated Annealing* (Srigutomo dkk., 2021; Y. Wang dkk., 2021), *Cuckoo Search* (Turan-Karaoğlu dan Göktürkler, 2021), *Genetic Algorithm* (Wahyudi dkk., 2014; J. Wang dan Tan, 2005), *Flower Pollination Algorithm* (Widodo dkk., 2022), dan banyak lainnya.

Dalam penelitian ini, inversi VES akan menggunakan metode optimasi global *flower pollination algorithm* (FPA) untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan fungsi *non-linear*. Pada tahun 2012, terinspirasi oleh perilaku penyerbukan bunga di alam, Yang (2012) mengusulkan algoritma yang baru dan efisien, yang disebut sebagai algoritma pollinasi bunga (FPA). FPA memiliki kemampuan pencarian yang kuat, beberapa parameter dan struktur yang sederhana. FPA adalah algoritma optimasi metaheuristik yang terinspirasi dari alam yang memodelkan proses pollinasi di alam, termasuk mekanisme transfer serbuk sari oleh pollinator (pollinasi biotik), oleh difusi angin dan air (polinasi abiotik), dalam bunga tanaman yang sama (*self pollination*) dan dalam bunga-bunga tanaman yang berbeda (*cross-pollination*) (Yang, 2012). Strategi-strategi penyerbukan ini dimodelkan sebagai pencarian global (penyerapan biotik dan pollinasi lintas) dan pencarian lokal (penyerapan abiotik dan penyerapan diri) di FPA, dengan probabilitas switch, dimasukkan untuk menyeimbangkan pencarian global dan pencari lokal. FPA memiliki keuntungan karena memiliki konvergensi yang cepat, iterasi yang lebih sedikit, dan kesalahan yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode pengoptimalan berbasis alam lainnya. FPA telah banyak digunakan untuk memecahkan masalah di berbagai bidang, seperti pada keamanan jaringan, manajemen aliran energi, ekonomi, dan teknik elektro. Pengembangan FPA telah dilakukan untuk memperoleh tingkat keberhasilan optimasi yang lebih cepat dan efisien. Kinerja FPA dapat ditingkatkan dengan menggabungkannya dengan teknik optimasi global lainnya seperti algoritma evolusi diferensial, algoritma optimasi paus, dan jenis hibridisasi lainnya. Algoritma

optimasi tunggal mungkin memiliki beberapa kelemahan, sementara penggunaan dua algoritma dengan manfaat yang berbeda secara organik dikombinasikan sesuai dengan aturan tertentu untuk menciptakan algoritma hibrida, yang dapat mempromosikan kinerja algoritma ke tingkat baru (Talbi, 2002; Yildizdan dan Baykan, 2020). Di antara algoritma optimasi cerdas tersebut, evolusi diferensial (DE) menonjol karena strukturnya yang sederhana, kemudahan implementasinya, kemampuan pencarian global yang kuat dan kinerja yang sangat baik (Neri dan Tirronen, 2010; Storn dan Price, 1997b). DE adalah algoritma optimasi kecerdasan swarm yang muncul, yang diusulkan oleh Storn (1997). Algoritma mensimulasikan prinsip evolusi biologis, dan tidak bergantung pada informasi karakteristik dari masalah yang akan dioptimalkan, dan cocok untuk memecahkan masalah optimasi global dalam lingkungan yang kompleks. Kinerja *Hybrid Differential Evolution Flower Pollination Algorithm* (HDEFPA) akan diuji menggunakan data VES sintetik.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama periode semester genap 2023/2024 di Laboratorium Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura. Data yang digunakan merupakan data lapangan dari eksplorasi intrusi air laut di daerah Pulauw, Provinsi Maluku, Indonesia.

2.2. Alat dan Bahan

Langkah-langkah pengerjaan dalam penelitian ini adalah, pemrosesan data awal, penentuan parameter inversi, implementasi HDEFPA, evaluasi hasil inversi, analisis dan interpretasi.

2.3. Prosedur Kerja

Langkah-langkah pengerjaan dalam penelitian ini adalah, pemrosesan data awal, penentuan parameter inversi, implementasi HDEFPA, evaluasi hasil inversi, analisis dan interpretasi.

2.4. Metode Analisis Data

Dalam penelitian yang dilakukan, digunakan metode analisis data kuantitatif. Analisis kuantitatif dilakukan dengan melakukan pemodelan kebelakang dengan metode HDEFPA menggunakan MATLAB agar mendapatkan nilai resistivitas bawah permukaan.

Perumusan dari RMSE dapat dituliskan menggunakan persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Menggunakan Data Sintetik Tanpa Noise

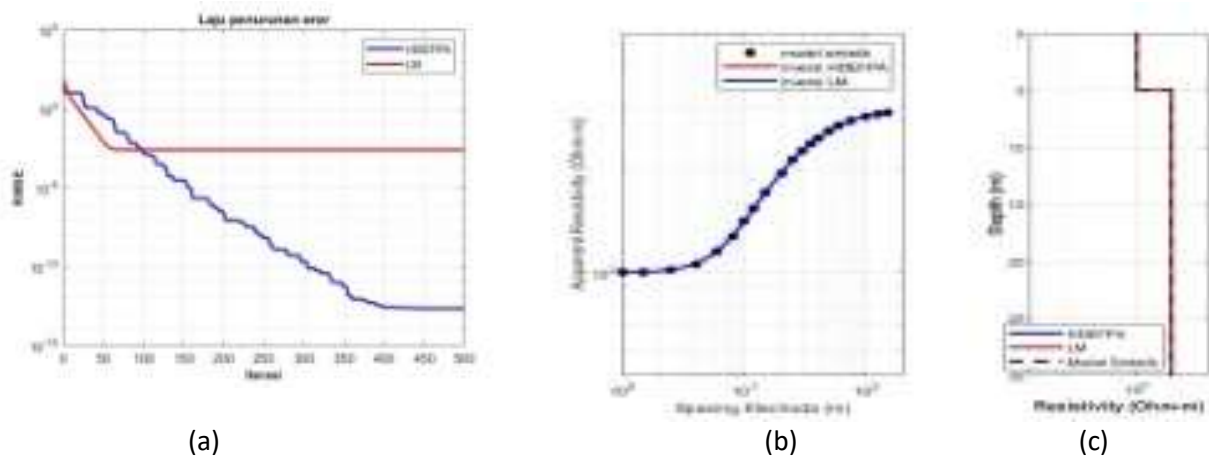
3.1.1. Pengujian Pada Model Bumi 2 lapis

Tabel 1. Hasil inversi data sintetik menggunakan HDEFPA pada model bumi 2 lapis tanpa *noise*

Parameter	Model Sintetik	HDEFPA	LM
ρ_1 (Ωm)	100	100 ± 0.00	98.95
ρ_2 (Ωm)	300	300 ± 0.00	289.10
h_1 (m)	5	5 ± 0.00	4.552
RMSE		4.87×10^{-12}	0.0025

Hasil inversi menggunakan metode HDEFPA menunjukkan kesesuaian yang sangat akurat dengan model sintetik untuk semua parameter tersebut. Sementara itu, metode LM menghasilkan nilai yang mendekati tetapi dengan variasi yang lebih besar, yaitu $\rho_1 = 98.95 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 289.10 \Omega \cdot m$, dan $h_1 = 4.552$ m.

Nilai RMSE yang diperoleh dari metode HDEFPA adalah 4.87×10^{-12} , yang menunjukkan akurasi sangat tinggi, sedangkan metode LM memiliki nilai RMSE sebesar 0.0025. Grafik laju penurunan error menunjukkan bahwa metode HDEFPA (garis biru) memiliki konvergensi yang lebih baik dibandingkan dengan metode LM (garis merah), mencapai RMSE yang sangat rendah ($\approx 10^{-12}$) setelah sekitar 450 iterasi.



Gambar 1. Hasil pengujian pada model bumi dua lapis tanpa *noise*, (a) laju penurunan error, (b) grafik resistivitas semu terhadap $AB/2$, dan (c) distribusi resistivitas terhadap kedalaman

3.1.2. Pengujian Pada Model Bumi 3 lapis

Tabel 2. Parameter data sintetik pada model bumi 3 lapis

Tipe Model	Parameter Model	
	Resistivitas (Ωm)	Ketebalan (m)
Tipe H jenis 1	150	5
	25	10

	700	-
	100	10
Tipe H jenis 2	10	15
	300	-
	50	5
Tipe K jenis 1	750	10
	10	-
	100	5
Tipe K jenis 2	300	10
	10	-
	25	5
Tipe A jenis 1	150	10
	700	-
	20	10
Tipe A jenis 2	100	15
	300	-
	700	5
Tipe Q jenis 1	150	10
	25	-
	300	10
Tipe Q jenis 2	100	15
	20	-

Batas bawah dan batas atas untuk nilai resistivitas ialah $0 \Omega m$ dan $1.500 \Omega m$. Sedangkan batas bawah dan batas atas untuk ketebalan lapisan ialah 0 meter hingga 200 meter. Jumlah iterasi yang digunakan untuk inversi HDEFPA dan LM ialah sebanyak 3.000 iterasi.

3.1.3. Pengujian Pada Model 4 Lapis

Batas bawah dan batas atas untuk nilai resistivitas ialah $0 \Omega m$ dan $1.500 \Omega m$. Sedangkan batas bawah dan batas atas untuk ketebalan lapisan ialah 0 meter hingga 200 meter. Jumlah iterasi yang digunakan untuk inversi HDEFPA dan LM ialah sebanyak 3.000 iterasi.

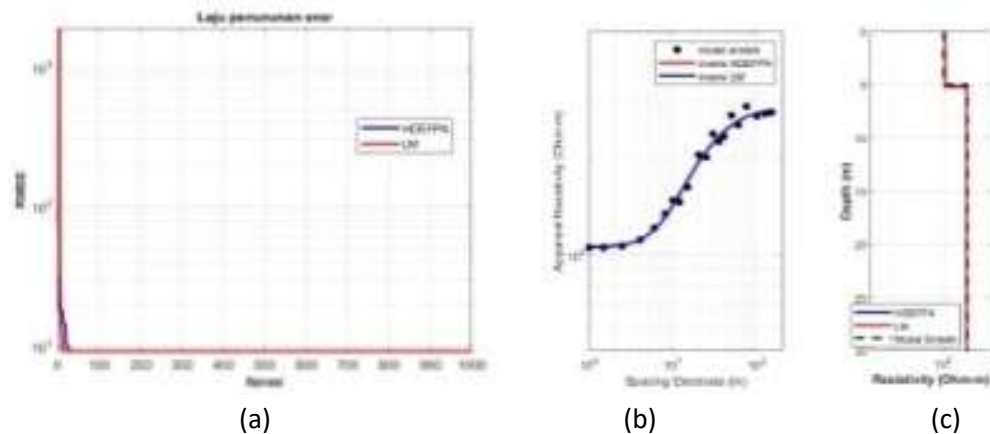
3.2. Hasil Pengujian Menggunakan Data Sintetik dengan Diberikan Noise

3.2.1. Pengujian Pada Model 2 Lapis

Tabel 3. Hasil inversi data sintetik menggunakan HDEFPA pada model bumi 2 lapis dengan *noise* 5%

Parameter	Model Sintetik	HDEFPA	LM
$\rho_1 (\Omega m)$	100	105.57 ± 0.00	105.773
$\rho_2 (\Omega m)$	300	290.23 ± 0.00	290.13
$h_1 (m)$	5	5.16 ± 0.00	5.22
RMSE		9.106085	9.1195

Tabel di atas membandingkan parameter resistivitas dan ketebalan dari tiga model berbeda, yaitu "Model Sintetik", "HDEFPA", dan "LM". Parameter yang dibandingkan adalah resistivitas lapisan pertama (ρ_1), resistivitas lapisan kedua (ρ_2), dan ketebalan lapisan pertama (h_1). Selain itu, nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) juga disajikan untuk masing-masing model. Model Sintetik digunakan sebagai acuan, di mana HDEFPA menghasilkan nilai parameter yang mendekati model sintetik dengan $\rho_1 = 105.57 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 290.23 \Omega\text{m}$, dan $H_1 = 5.16 \text{ m}$ serta RMSE sebesar 9.106085. Model LM, sementara itu, menghasilkan parameter yang sedikit berbeda dari model sintetik dengan $\rho_1 = 105.773 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 290.13 \Omega\text{m}$, dan $h_1 = 5.22 \text{ m}$ serta RMSE sebesar 9.1195.



Gambar 2. Hasil pengujian pada model bumi dua lapis dengan *noise* 5%, (a) laju penurunan error, (b) grafik resistivitas semu terhadap $AB/2$, dan (c) distribusi resistivitas terhadap kedalaman

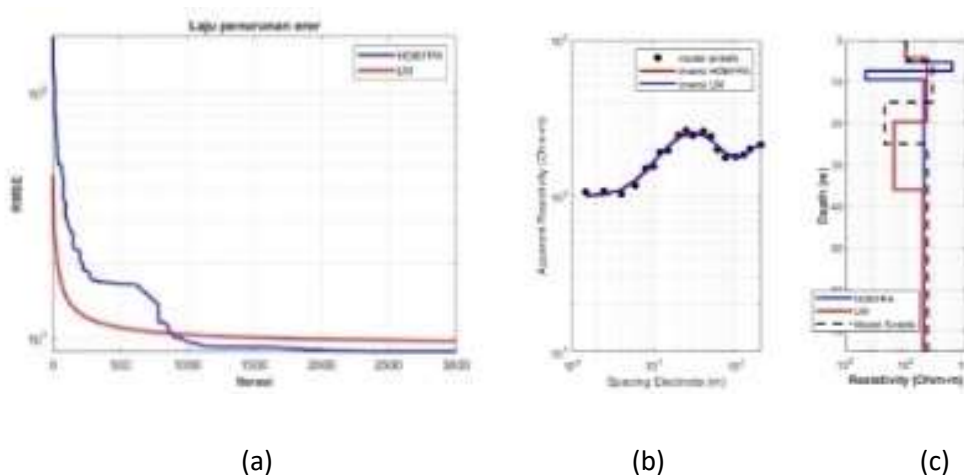
3.2.2. Pengujian Pada Model 4 Lapis

Tabel 4. Hasil inversi data sintetik menggunakan HDEFPA pada model bumi 4 lapis tipe KH dengan *noise* 5%

Parameter	Model Sintetik	HDEFPA	LM
$\rho_1 (\Omega\text{m})$	100	100.8587 ± 0.00	98.772
$\rho_2 (\Omega\text{m})$	750	3464.228 ± 364.05	474.317
$\rho_3 (\Omega\text{m})$	20	4.710023 ± 0.10	40.782
$\rho_4 (\Omega\text{m})$	500	389.159 ± 0.06	373.938
$h_1 (\text{m})$	5	5.336834 ± 0.01	4.303
$h_2 (\text{m})$	10	2.128664 ± 0.30	15.36
$h_3 (\text{m})$	10	2.019071 ± 0.04	98.772
RMSE		8.7790	9.6868

Pada resistivitas lapisan pertama (ρ_1), data sintetis menunjukkan nilai 100 Ωm . Hasil inversi HDEFPA memberikan estimasi $100.8587 \pm 0.00 \Omega\text{m}$, sedangkan LM memberikan 98.772 Ωm . Resistivitas lapisan kedua (ρ_2) dari data sintetis adalah 750 Ωm . Model HDEFPA memberikan estimasi sebesar $3464.228 \pm 364.05 \Omega\text{m}$, sementara LM memberikan 474.317 Ωm . Untuk resistivitas lapisan ketiga (ρ_3), data sintetis menunjukkan nilai 20 Ωm . Hasil inversi HDEFPA memberikan estimasi $4.710023 \pm 0.10 \Omega\text{m}$, sedangkan LM memberikan 40.782 Ωm . Resistivitas lapisan keempat (ρ_4) menunjukkan perbedaan yang sangat besar, dengan data sintetis sebesar 500 Ωm , estimasi HDEFPA $389.159 \pm 0.06 \Omega\text{m}$, dan LM 373.938 Ωm .

Ketebalan lapisan pertama (h_1) dari data sintetis adalah 5 meter, dengan estimasi HDEFPA 5.336834 ± 0.01 m dan LM 4.303 m. Sedangkan untuk ketebalan lapisan kedua (h_2) dari data sintetis adalah 10 meter, dengan estimasi HDEFPA 2.128664 ± 0.30 m dan LM 15.36 m dan ketiga (h_3) dari data sintetis adalah 10 meter, dengan estimasi HDEFPA 2.019071 ± 0.04 m dan LM 98.772 m, terdapat variasi yang cukup besar antara hasil inversi HDEFPA dan LM.



Gambar 3.1 Hasil pengujian pada model bumi empat lapis tipe KH dengan *noise* 5%, (a) laju penurunan error, (b) grafik resistivitas semu terhadap $AB/2$, dan (c) distribusi resistivitas terhadap kedalaman

3.3. Analisis Hasil Pengujian Program Menggunakan Data Sintetik

Berdasarkan hasil pengujian beberapa jenis model, dapat dilihat bahwa metode HDEFPA cenderung memberikan estimasi yang lebih dekat dengan nilai data sintetis daripada model LM, terutama pada kasus pengujian tanpa *noise*. Namun, pada kasus dengan *noise* 5%, kedua model menghasilkan estimasi yang cukup dekat meskipun terdapat variasi yang sedikit. Hal ini mengindikasikan bahwa model HDEFPA memiliki kinerja yang lebih baik dalam memperkirakan data tanpa adanya *noise*, yang merupakan kondisi ideal dalam banyak kasus penggunaan. Sementara itu, kinerja model LM juga tidak bisa diabaikan, karena mampu memberikan estimasi yang masih relatif dekat meskipun ada gangguan *noise* sebesar 5%.

Dari segi aplikasi praktis, pemilihan model tergantung pada konteks penggunaannya. Jika data yang dihadapi cenderung bersih tanpa *noise*, model HDEFPA mungkin menjadi pilihan yang lebih baik karena kemampuannya dalam memberikan estimasi yang mendekati nilai sebenarnya. Namun, jika kondisinya sering kali dihadapkan pada data dengan *noise* yang signifikan, model LM juga bisa menjadi alternatif yang layak dipertimbangkan karena kemampuannya yang tetap solid dalam situasi tersebut. Dalam penelitian lebih lanjut, mungkin dapat dieksplorasi juga bagaimana kinerja kedua model ini dalam menghadapi variasi tingkat *noise* yang lebih tinggi atau dalam situasi data yang lebih kompleks, seperti pola yang lebih acak atau tidak

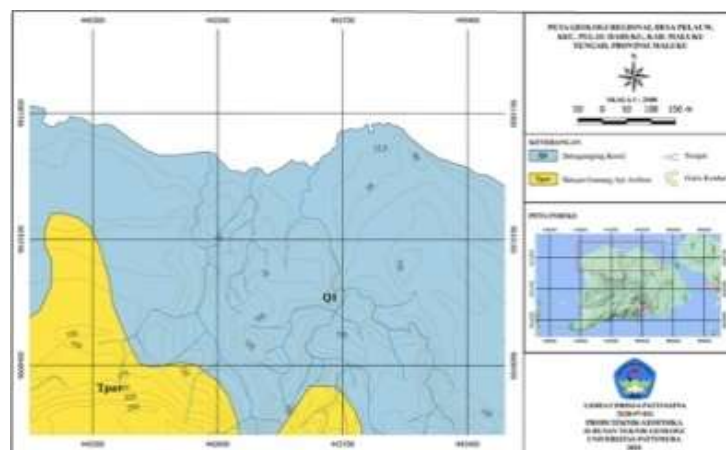
teratur. Hal ini dapat memberikan wawasan tambahan tentang keunggulan dan batasan masing-masing model dalam berbagai kondisi penggunaan yang berbeda.

3.4. Pengujian HDEFPA Menggunakan Data Lapangan

Data lapangan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data VES yang diambil pada November 2022 di Desa Pelauw, Kecamatan Pulau Haruku, Kabupaten Maluku Tengah, Maluku (Bahri dkk., 2024).



Gambar 4. Peta lokasi penelitian Desa Pelauw



Gambar 5. Peta geologi regional Desa Pelauw

Desa Pelauw terletak di Pulau Haruku, di sebelah timur Pulau Ambon, dan di sebelah barat Pulau Saparua. Secara umum, cuaca di Kepulauan Maluku terdiri dari musim panas dan musim hujan. Curah hujan tahunan rata-rata 134,45 mm, dengan curah hujan tertinggi 262,98 mm terjadi pada bulan Juni dan terendah 56,82 mm terjadi pada bulan November. Data tersebut diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Secara morfologi, daerah penelitian terdiri dari dataran, landai, bergelombang, dan perbukitan yang curam. Selama fase Jura Akhir hingga Kapur Awal, patahan yang berhubungan dengan pemisahan batuan Kapur dan batuan karbonat terjadi.

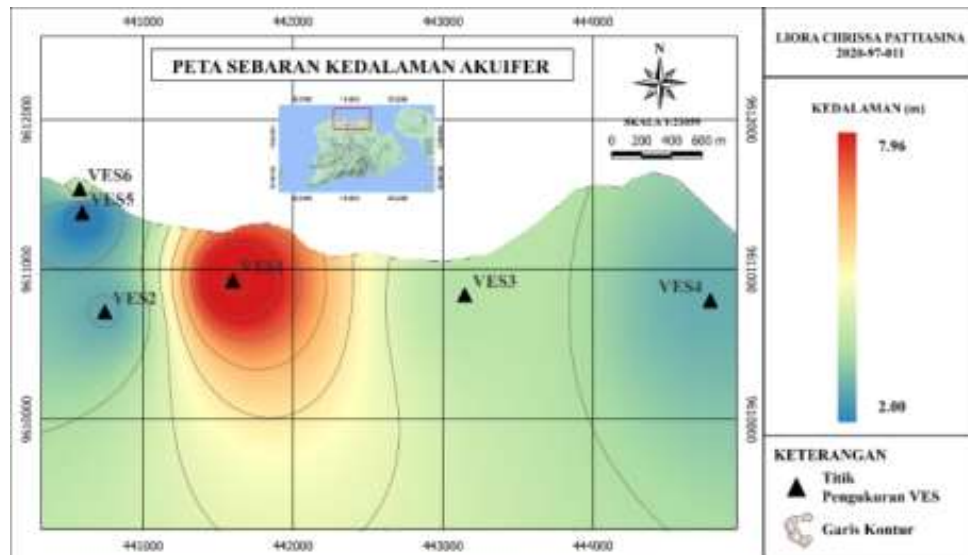
Penurunan permukaan laut selama periode Campanian menyebabkan pengendapan batu pasir dan lapisan batuan karbonat yang tebal (Formasi Oliver dan Barracouta) (Pownall dkk., 2013).

Pulau Haruku memiliki sesar aktif sepanjang 14 km yang membentang ke arah timur, namun bagian barat sesar tersebut membelok ke arah timur laut (Patria dkk., 2021). Litologi Pulau Haruku didominasi oleh batuan vulkanik Ambon (Ambonites), batu gamping, dan endapan sedimen. Batuan Ambon adalah produk dari dua gunung berapi Hitu yang terdiri dari tufa, breksi vulkanik, dan aglomerat. Amonit berkorelasi dengan granit kordierit karena keduanya mengandung sillimanit-spinel aluminus yang identik dan memiliki feno/xenokris kordierit dan garnet (Pownall dkk., 2013). Formasi batu kapur berumur Pleistosen dan terdiri dari koral, ganggang, dan bryozoa. Litologi termuda adalah endapan sedimen yang ditemukan di pantai utara Pulau Haruku, yang terdiri dari batupasir, batulempung, dan batulempung (Tjokrosaputro dkk., 1993).

Tabel 5. Hasil inversi data lapangan VES dan interpretasi litologinya

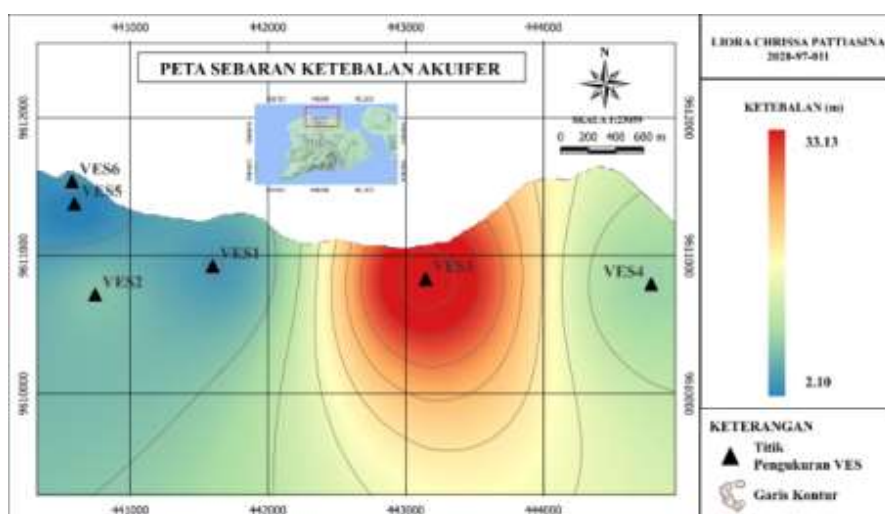
VES Points	Lapisan	Resistivity (Ohm.m)	Ketebalan (m)	Litologi	Interpretasi Hydrological
VES 1	1	111.21	9.18	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	21.66	3.92	Pasiran	Akuifer
	3	1993.94	-	Batugamping terumbu	Akuitard
VES 2	1	196.89	2.62	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	32.76	7.66	Pasiran	Akuifer
	3	499.99	-	Batugamping terumbu	Akuitard
VES 3	1	46.41	3.70	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	11.88	37.77	Pasiran	Akuifer
	3	3000	-	Batugamping terumbu	Akuitard
VES 4	1	312.79	2.72	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	99.23	8.98	Pasiran	Akuifer
	3	1648.01	-	Batugamping terumbu	Akuitard
VES 5	1	814	4.72	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	113.91	37.20	Pasiran	Akuifer
	3	39359.15	-	Batugamping terumbu	Akuitard
VES 6	1	268.70	4.06	Batugamping pasiran	Akuitard
	2	16.10	4.22	Pasiran	Akuifer
	3	25000	-	Batugamping terumbu	Akuitard

3.5. Analisis Potensi Akuifer di Daerah Penelitian



Gambar 6. Peta sebaran kedalaman akuifer

Peta Sebaran Kedalaman Akuifer di daerah Pulauw memberikan gambaran mengenai variasi kedalaman akuifer berdasarkan hasil pengukuran VES (*Vertical Electrical Sounding*) di enam titik yang ditandai dengan simbol segitiga hitam, yaitu VES1 hingga VES6. Kedalaman akuifer ditunjukkan melalui skala warna pada peta, mulai dari biru (kedalaman minimum sekitar 2 meter) hingga merah (kedalaman maksimum sekitar 7.96 meter). Titik VES1 menunjukkan kedalaman akuifer terbesar dengan warna merah, mendekati 7.96 meter, sementara titik VES5 dan VES6 menunjukkan kedalaman yang lebih dangkal dengan warna biru, sekitar 2 meter. Garis kontur pada peta mengilustrasikan perubahan kedalaman akuifer, dengan kontur rapat menunjukkan perubahan kedalaman yang cepat dan kontur jarang menunjukkan perubahan yang lebih lambat.



Gambar 7. Peta sebaran ketebalan akuifer

Peta Sebaran Ketebalan Akuifer di daerah yang sama juga menunjukkan hasil pengukuran pada enam titik yang sama. Ketebalan akuifer ditunjukkan dengan skala warna mulai dari biru (ketebalan minimum sekitar 2.10 meter) hingga merah (ketebalan maksimum sekitar 33.13 meter). Titik VES3 menampilkan ketebalan akuifer terbesar dengan warna merah, mendekati 33.13 meter, sedangkan titik VES5 dan VES6 menunjukkan ketebalan yang lebih kecil dengan warna biru, sekitar 2.10 meter. Garis kontur pada peta ini menunjukkan perubahan ketebalan akuifer, dengan kontur rapat mengindikasikan perubahan ketebalan yang cepat dan kontur jarang mengindikasikan perubahan yang lebih lambat.

Peta-peta ini menunjukkan bahwa daerah sekitar titik VES1 dan VES3 memiliki kedalaman dan ketebalan akuifer yang signifikan, menandakan potensi sumber air tanah yang lebih besar. Sebaliknya, daerah sekitar titik VES 5 dan VES 6 memiliki kedalaman dan ketebalan akuifer yang lebih kecil, menunjukkan potensi sumber air tanah yang lebih rendah. Informasi dari pemetaan ini sangat penting untuk perencanaan pengelolaan sumber daya air di daerah Pulau.

4. KESIMPULAN

- a) Kecepatan konvergensi yang cukup baik. Jika dibandingkan dengan program inversi 1m, program hdefpa memiliki kinerja yang cukup baik. Pada beberapa model sintetik hasil inversi hdefpa mendapatkan parameter model yang lebih mendekati model yang sebenarnya. Dengan menggunakan 3000 iterasi, program hdefpa menunjukkan stabilitas dan akurasi yang lebih tinggi dalam proses konvergensi. Hasil inversi menunjukkan bahwa metode geolistrik lebih sensitif untuk mendeteksi lapisan konduktif dibandingkan lapisan resistif.
- b) Program inversi data ves menggunakan algoritma hdefpa dilakukan pengujian menggunakan 6 data lapangan di daerah pulau. Berdasarkan hasil inversi didapatkan model bawah permukaan 3 lapis, dimana lapisan pertama merupakan batugamping pasir (46.41 - 312.79 ωm), lapisan kedua merupakan pasir (11.88 - 113.91 ωm) dan lapisan ketiga merupakan batugamping terumbu (499.99 - 39359.15 ωm). Pengukuran ves digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan akuifer dimana pada daerah penelitian akuifer berupa pasir dengan kedalaman 2 – 7.96 m.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan jurnal ini. Terima kasih kepada pembimbing atas arahan dan masukan yang berharga, serta kepada rekan-rekan yang telah memberikan dukungan dan inspirasi. Semoga jurnal ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan pengembangan ilmu di bidang terkait.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel Zaher, M., Younis, A., Shaaban, H., & Mohamaden, M. I. I. (2021). Integration of geophysical methods for groundwater exploration: A case study of El Sheikh Marzouq area, Farafra Oasis, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 47(2), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.03.001>
- Alarifi, S. S., Abdelrahman, K., & Hazaea, B. Y. (2022). Depicting of groundwater potential in hard rocks of southwestern Saudi Arabia using the vertical electrical sounding approach. *Journal of King Saud University - Science*, 34(7), 102221. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102221>
- Ammar, A. I., Gomaa, M., & Kamal, K. A. (2021). Applying of SP, DC-Resistivity, DC-TDIP and TDEM soundings in high saline coastal aquifer. *Heliyon*, 7(7), e07617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07617>

- Arunbose, S., Srinivas, Y., & Rajkumar, S. (2021). Efficacy of hydrological investigation in Karumeniyar river basin, Southern Tamil Nadu, India using vertical electrical sounding technique: A case study. *MethodsX*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101215>
- Asare, A., Appiah-Adjei, E. K., Owusu-Nimo, F., & Ali, B. (2022). Lateral and vertical mapping of salinity along the coast of Ghana using Electrical Resistivity Tomography: The case of Central Region. *Results in Geophysical Sciences*, 12, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2022.100048>
- Bahri, S., Ramadhan, A., & Zulfiah. (2023). Investigation of Groundwater Quality using Vertical Electrical Sounding and Dar Zarrouk Parameter in Leihitu, Maluku, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(3), 221–228. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.3.12976>
- Bahri, S., Tualepe, D., Batlolona, Y. T., Ramadhan, A., & Parnadi, W. W. (2024). Vertical electrical sounding method and Dar Zarrouk analysis to identify the distribution of seawater intrusion in Pelauw Village, Maluku. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(4), 6089–6097. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.114.6089>
- Cui, Y., Zhang, L., Zhu, X., Liu, J., & Guo, Z. (2020). Inversion for magnetotelluric data using the particle swarm optimization and regularized least squares. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104156>
- Folorunso, A. F. (2021). Mapping a spatial salinity flow from seawater to groundwater using electrical resistivity topography techniques. *Scientific African*, 13, e00957. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00957>
- Hapsoro, C. A., Srigutomo, W., Purqon, A., Warsa, W., Sutarno, D., & Kagiya, T. (2021). Global Inversion of Grounded Electric Source Time-domain Electromagnetic Data Using Particle Swarm Optimization. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(1), 210101. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.1>
- H. Grandis, & Sungkono. (2022). Modified symbiotic organism search (SOS) algorithm for controlled-source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) one-dimensional (1D) modelling. *J. Earth Syst. Sci*, 131(1), 61.
- Junian, W. E., & Grandis, H. (2023). HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND GREY WOLF OPTIMIZER ALGORITHM FOR CONTROLLED SOURCE AUDIO-FREQUENCY MAGNETOTELLURICS (CSAMT) ONE-DIMENSIONAL INVERSION MODELLING. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 38(3), 65–80. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.3.6>
- Kaplanvural, İ., Pekşen, E., & Özkap, K. (2020). 1D waveform inversion of GPR trace by particle swarm optimization. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104157. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104157>
- Kazakis, N., Pavlou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K. S., Soulios, G., Pliakas, F., & Tsokas, G. (2016). Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of The Total Environment*, 543, 373–387. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.041>
- Mahmud, S., Hamza, S., Irfan, M., Huda, S. N., Burke, F., & Qadir, A. (2022). Investigation of groundwater resources using electrical resistivity sounding and Dar Zarrouk parameters for Uthal Balochistan, Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100738. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100738>
- Neri, F., & Tirronen, V. (2010). Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis. *Artificial Intelligence Review*, 33(1–2), 61–106. <https://doi.org/10.1007/s10462-009-9137-2>

- Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P., Ukabam, C. S., Kayode, O. T., Olajojo, A. A., & Metwaly, M. (2023). Nonlinear inversion of electrical resistivity sounding data for multi-layered 1-D earth model using global particle swarm optimization (GPSO). *Heliyon*, 9(6), e16528. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16528>
- Patria, A., Tsutsumi, H., & Natawidjaja, D. H. (2021). Active fault mapping in the onshore northern Banda Arc, Indonesia: Implications for active tectonics and seismic potential. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218, 104881. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104881>
- Pownall, J. M., Hall, R., & Watkinson, I. M. (2013). Extreme extension across Seram and Ambon, eastern Indonesia: evidence for Banda slab rollback. *Solid Earth*, 4(2), 277–314. <https://doi.org/10.5194/se-4-277-2013>
- Srigutomo, W., Hapsoro, C. A., Purqon, A., Warsa, Sutarno, D., & Kagiya, T. (2021). Nonlinear Inversion Using Very Fast Simulated Annealing for Horizontal Electric Dipole Time-Domain Electromagnetic Data. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 21(5), 379–390. <https://doi.org/10.26866/jees.2021.5.r.46>
- Storn, R., & Price, K. (1997a). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Storn, R., & Price, K. (1997b). Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- Talbi, E.-G. (2002). A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics. *Journal of Heuristics*, 8(5), 541–564. <https://doi.org/10.1023/A:1016540724870>
- Tjokrosaputro, S., Rusmana, E., & Achdan, A. (1993). *Peta geologi lembar Ambon, Maluku [peta] = Geological map of the Ambon sheet, Maluku / oleh S. Tjokrosaputro, E. Rusmana dan A. Achdan.*
- Turan-Karaoğlu, S., & Göktürkler, G. (2021). Cuckoo Search Algorithm for model parameter estimation from self-potential data. *Journal of Applied Geophysics*, 194, 104461. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104461>
- Wahyudi, E. J., Santoso, D., Kadir, W. G. A., & Alawiyah, S. (2014). Designing a Genetic Algorithm for Efficient Calculation in Time-Lapse Gravity Inversion. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 46(1), 58–77. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2014.46.1.4>
- Wang, J., & Tan, Y. (2005). 2-D MT inversion using genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 12, 165–170. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/12/1/016>
- Wang, Y., Wang, H., Wu, X., Chen, K., Liu, S., & Deng, X. (2021). Near-surface velocity inversion from Rayleigh wave dispersion curves based on a differential evolution simulated annealing algorithm. *Artificial Intelligence in Geosciences*, 2, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.aiig.2021.10.001>
- Widodo, W., Raflesia, F., Awaliyah, S., Setianingsih, S., Santoso, D., Parnadi, W., & Fatkhan, F. (2022). Flower Pollination and Elitism Algorithms for Inversion of TDEM Data. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 54(1), 121–137. <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2022.54.1.7>
- Yang, X.-S. (2012). *Flower Pollination Algorithm for Global Optimization* (hlm. 240–249). https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27
- Yang, X.-S., & Karamanoglu, M. (2020). Nature-inspired computation and swarm intelligence: a state-of-the-art overview. Dalam *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence* (hlm. 3–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819714-1.00010-5>

Yildizdan, G., & Baykan, Ö. K. (2020). A novel modified bat algorithm hybridizing by differential evolution algorithm. *Expert Systems with Applications*, 141, 112949. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112949>