

Pemetaan Kerentanan Akuifer dan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate Berdasarkan Metode *Vertical Electrical Sounding* dan Parameter Hidrogeologi

Mapping of Groundwater Potential and Aquifer Vulnerability in the Coastal Area of Ternate Island Using Vertical Electrical Sounding Method and Hydrogeological Parameters

Ratna Amalia Nur Aini¹, Acep Ruchimat², Wiyono², Dwa Desa Warnana¹, dan M. Haris Miftakhul Fajar¹

¹Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

²Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Bandung, Indonesia

e-mail: rtn.amalia0107@gmail.com

Naskah diterima 21 Mei 2025, selesai direvisi 13 Juli 2025, dan disetujui 23 Agustus 2025

ABSTRAK

Pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang terus meningkat serta distribusi air bersih yang belum merata di Pulau Ternate menyebabkan kebutuhan air tanah semakin banyak, sehingga diperlukan kegiatan untuk memenuhi keberlanjutan pasokan air bersih bagi masyarakat di Pulau Ternate. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan memetakan kerentanan akuifer dan potensi air tanah di pesisir Pulau Ternate menggunakan metode *Vertical Electrical Sounding* (VES) dan parameter hidrogeologi. Penelitian ini mengintegrasikan parameter turunan VES dan parameter hidrogeologi menggunakan metode AHP dalam evaluasi akuifer. Parameter turunan VES yang digunakan adalah konduktansi longitudinal, resistansi transversal, dan koefisien anisotropi, sedangkan parameter hidrogeologi, yaitu konduktivitas hidrolik dan transmisivitas. Pendekatan tersebut belum banyak diterapkan, terutama di pulau vulkanik kecil seperti Pulau Ternate. Lokasi penelitian memiliki 2 jenis akuifer, yaitu akuifer bebas dan akuifer tertekan, yang diidentifikasi tersusun dari endapan piroklastik, breksi vulkanik, atau lava lapuk. Hasil perhitungan menunjukkan nilai konduktansi longitudinal 0.00073 - 5.96 siemens, resistansi transversal 92.5 - 16790 Ωm^2 , koefisien anisotropi 1.0 - 3.2, konduktivitas hidrolik 4.8 - 100.0 m/hari, dan transmisivitas 6 - 3313 m²/hari. Dari hasil pemetaan diketahui sebagian besar lokasi penelitian memiliki kerentanan akuifer yang tinggi dan hanya sedikit wilayah dengan kerentanan akuifer yang rendah, yaitu di wilayah selatan. Selain itu, lokasi penelitian diidentifikasi memiliki potensi air yang rendah hingga sangat tinggi, di mana wilayah tenggara dan selatan memiliki potensi air tanah yang lebih besar dibandingkan wilayah lainnya.

Kata kunci: kerentanan akuifer, potensi air tanah, *Vertical Electrical Sounding*

ABSTRACT

The continuous growth of population and economy and the uneven distribution of clean water on Ternate Island have led to an increasing demand for groundwater, necessitating measures to ensure a sustainable supply of clean water for the community on Ternate Island. This study aims to evaluate and map the vulnerability of aquifers and groundwater potential along the coast of Ternate Island using the *Vertical Electrical Sounding* (VES) method and hydrogeological parameters. This study integrates VES-derived parameters and hydrogeological parameters using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method in the evaluation of aquifers. The VES-derived parameters used are longitudinal conductance, transverse resistance, and the anisotropy coefficient, while the hydrogeological parameters are hydraulic conductivity and transmissivity. This approach has not been widely applied, particularly on small volcanic islands such as Ternate Island. The study area has two types of aquifers, these are unconfined aquifers and confined aquifers, which were identified as being composed of pyroclastic, volcanic breccia, or weathered lava deposits. The calculation results shows longitudinal conductivity values around 0.00073 – 5.96 siemens, transverse resistance values between 92.5 – 16790 Ωm^2 , anisotropy coefficient values around 1.0 – 3.2, hydraulic conductivity values between 4.84 – 99.96

m/day, and transmissivity values around 6 – 3313 m²/day. The mapping results shows that most of the study areas have high aquifer vulnerability and only a few areas have low aquifer vulnerability, namely in the southern area. Furthermore, the study area is identified as having low to very high groundwater potential, with the southeast and south areas have greater groundwater potential than other areas

Keywords: *aquifer vulnerability, groundwater potential, Vertical Electrical Sounding*

PENDAHULUAN

Pulau Ternate merupakan pulau vulkanik di Provinsi Maluku Utara, yang terdapat Gunung-gapi Gamalama di tengah pulau. Pulau ini memiliki luas sekitar 111,4 km² dan dikelilingi oleh Laut Maluku. Data BPS Provinsi Maluku Utara tahun 2024 menunjukkan Pulau Ternate memiliki penduduk sekitar 216.8 ribu jiwa dengan laju pertumbuhan 1,18% per tahun. Mayoritas penduduk tersebut bermukim dan beraktivitas di bagian pesisir, terutama di wilayah timur hingga selatan Pulau Ternate. Akibat pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang terus meningkat, kebutuhan air bersih di wilayah tersebut juga bertambah. Namun, 56 sumur milik Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Ternate hanya menyediakan kapasitas sekitar 545 l/s dari kapasitas 874 l/s (Daud *et al.*, 2022a). Selain itu, terdapat masyarakat yang belum terjangkau oleh jaringan PDAM, terutama di daerah tinggian seperti Kelurahan Tongole, di mana masyarakat masih memanfaatkan mata air pegunungan untuk kebutuhan sehari-hari (Thaib *et al.*, 2021).

Dalam eksplorasi air tanah, metode geofisika yang sering digunakan adalah metode *Vertical Electrical Sounding* (VES). Metode ini bersifat non-destruktif dan lebih hemat biaya untuk menemukan akuifer dibandingkan dengan metode pengeboran langsung (Oyeyemi *et al.*, 2019). Namun, penggunaan metode VES hanya sebatas untuk menemukan lokasi, jenis lapisan, kedalaman serta ketebalan akuifer. Padahal, tingkat perlindungan dan kondisi di dalam akuifer juga penting diketahui untuk mengetahui distribusi air tanah di suatu lokasi. Untuk meningkatkan keakuratan dalam menilai potensi air tanah dan kapasitas perlindungan akuifer, digunakan analisis berdasarkan metode geolistrik VES dan karakteristik hidrogeologi di Pulau Ternate (Sinha *et al.*, 2009).

Beberapa penelitian menggunakan metode geolistrik VES dan analisis hidrogeologi telah banyak digunakan untuk menganalisis zona potensi air tanah di suatu lokasi, seperti di daerah basement kompleks di barat daya Ado-Ekiti Nigeria (Olayinka and Oyedele, 2019), daerah perkebunan Fadaq di Bahr Al-Najaf, Irak (Abdulrazzaq *et al.*, 2020), dataran aluvial Sungai Porali, Uthal Balochistan, Pakistan (Mahmud *et al.*, 2022), Pangkalpinang, Indonesia (Nugraha *et al.*, 2023), dan daerah batuan keras pada Lembah Sungai Mandavi, India (Raju *et al.*, 2023). Selain untuk mengetahui potensi air tanah, beberapa penelitian yang sama juga dilakukan hingga mengevaluasi kerentanan akuifer, seperti di daerah batuan keras pada bagian barat daya Nigeria (Akinseye *et al.*, 2023), daerah industri Ashaka pada Sub-cekungan Gongola Nigeria (Kwami *et al.*, 2023), dan di bagian selatan Palung Benue Nigeria (Opara *et al.*, 2023) dan Sanaga Maritime, Cameroon (Mbinkong *et al.*, 2024). Walaupun penelitian dengan metode tersebut telah banyak dilakukan, penelitian mengenai kerentanan akuifer dan potensi air tanah di pulau vulkanik kecil, seperti Pulau Ternate, masih sangat terbatas. Selain itu, penelitian – penelitian sebelumnya masih menganalisis parameter geolistrik dan hidrogeologi secara terpisah dalam menilai potensi air tanah. Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan parameter – parameter tersebut menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP).

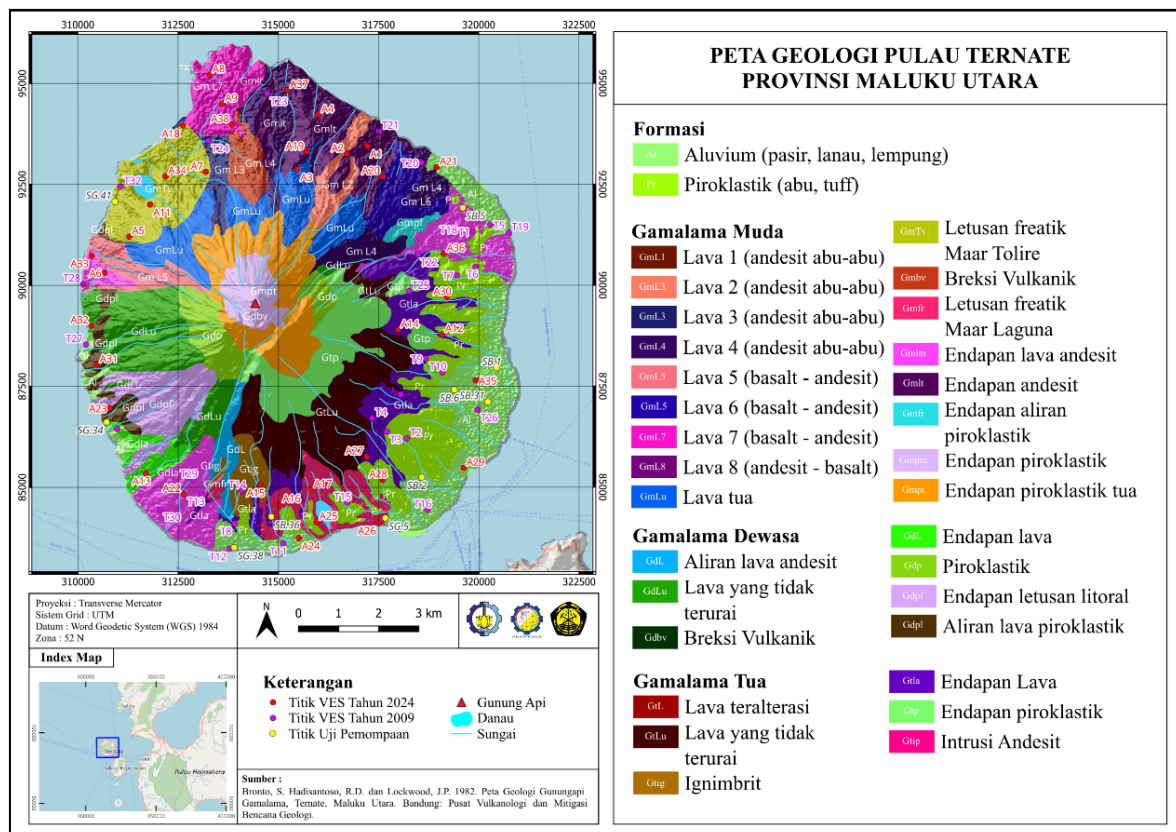
Penelitian ini bertujuan untuk memetakan kerentanan akuifer dan potensi air tanah di Pulau Ternate menggunakan metode VES dan parameter hidrogeologi. Dari data geolistrik hasil metode VES, dapat diperoleh parameter turunan yang disebut sebagai parameter *dar-zarrouk*, yaitu konduktansi longitudinal, resistansi transversal dan koefisien anisotropi, sedangkan dari uji

pemompaan, dapat diperoleh parameter hidrogeologi, seperti konduktivitas hidrolis, dan transmisivitas. Nilai parameter akuifer tersebut digunakan membantu mengevaluasi potensi air tanah dan kerentanan akuifer di pesisir Pulau Ternate, Maluku Utara.

Pulau Ternate merupakan hasil aktivitas vulkanik Gunung Gamalama yang berada di atas zona subduksi. Pulau ini didominasi oleh topografi pegunungan dan perbukitan karena adanya Gunung Gamalama di tengah pulau. Secara umum, Gunung Gamalama memiliki morfologi yang cenderung landai di daerah pesisir, dan semakin curam ke arah puncaknya (Daud *et al.*, 2022b). Menurut peta geologi dari Bronto *et al.* (1982), Pulau Ternate terdiri dari empat endapan utama, yaitu endapan permukaan dan tiga endapan batuan vulkanik Holosen (Gamalama Muda, Gamalama Dewasa, dan Gamalama Tua). Endapan permukaan dibagi menjadi endapan aluvium dan piroklastik tak teruraikan. Endapan ini

ditemukan di bagian selatan pulau dan sedikit di wilayah barat daya. Endapan Gamalama Muda terdiri dari 17 endapan dan dapat ditemukan di bagian utara Pulau Ternate. Endapan Gamalama Dewasa terdiri dari 7 endapan dan tersebar di bagian barat pulau. Endapan Gamalama Tua terdiri dari 6 endapan dan ditemukan di bagian tenggara dan selatan Pulau Ternate. Sebaran endapan Gunungapi Gamalama dan cakupan lokasi penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1.

Akibatnya topografi stratovulkano Gamalama, aliran air tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Ternate mengalir secara radial mengikuti profil geomorfologi Pulau Ternate. Pulau Ternate tersusun atas batuan vulkanik muda yang terdiri dari lava, tufa, dan breksi vulkanik. Batuan penyusun tersebut memiliki tingkat permeabilitas sedang hingga tinggi. Permeabilitas tinggi dapat ditemukan terutama pada lava vesikuler dan batuan piroklastik kurang padu. Berdasarkan keterdapatn air tanah di dalam akuifer, aku-



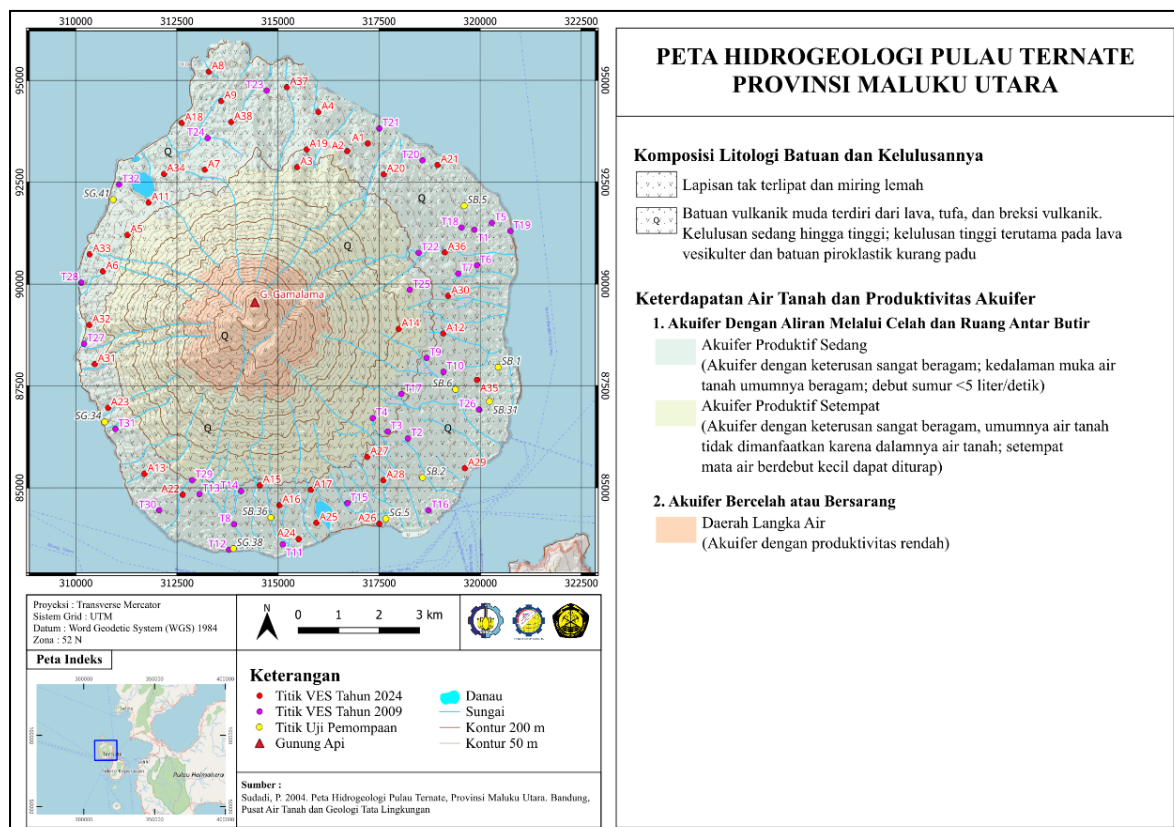
Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Bronto *et al.*, 1982).

fer di Pulau Ternate terdiri dari akuifer dengan aliran melalui celahan dan ruang antar butir, serta akuifer bercelah atau bersarang (Sudadi, 2004). Kondisi tersebut dijelaskan oleh peta hidrogeologi pada Gambar 2.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan 69 data geolistrik VES, yaitu 37 data dari tahun 2024 dan 32 data dari tahun 2009. Penggunaan data VES dari tahun 2024 dan 2009 dilakukan untuk memperluas cakupan spasial titik ukur. Hal ini karena tidak semua lokasi di Pulau Ternate tersurvei dalam satu tahun pengukuran. Penggabungan data dari kedua tahun tersebut memungkinkan terpenuhinya titik-titik kosong sehingga sebaran titik ukur menjadi lebih merata dan representatif dalam mengidentifikasi akuifer. Selain itu, apabila kedua data tersebut dibandingkan, rentang resistivitas yang terukur tidak jauh berbeda. Hal tersebut menunjukkan bahwa Pulau Ternate belum mengalami

perubahan geologi bawah permukaan yang masif dalam beberapa tahun belakangan sehingga masih relevan untuk digunakan. Data VES tersebut merupakan hasil pengukuran menggunakan konfigurasi Schlumberger dengan panjang lintasan 200 – 700 m. Data lapangan VES tersebut diolah menggunakan perangkat lunak *IX1D Interpex*. Dari pengolahan data VES, resistivitas akuifer di lokasi titik VES dapat diketahui. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data konduktivitas hidrolik dari 10 uji pemompaan sumur untuk menghitung parameter hidrogeologi di titik lain. Penelitian ini menggunakan data minatan hidrologi dari beberapa titik sumber air tanah, singkapan geologi, dan hasil penelitian – penelitian sebelumnya untuk membantu memvalidasi posisi akuifer karena ketiadaan data bor di lokasi penelitian. Hasil pengolahan data VES dan uji pemompaan digunakan untuk menentukan jenis dan lokasi akuifer, menghitung parameter akuifer (konduktansi longitudinal, resistansi transversal, koefisien anisotropi, konduktivitas hidrolik, dan



Gambar 2. Peta hidrogeologi lokasi penelitian (modifikasi dari Sudadi, 2004).

transmisivitas) di titik VES lain. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.

Konduktansi longitudinal diperoleh menggunakan persamaan (Maillet, 1947; Sinha *et al.*, 2009):

$$S = \frac{h}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

Jika terdapat “n” lapisan maka menggunakan persamaan (Asfahani, 2013) :

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \dots\dots\dots (2)$$

Konduktansi longitudinal dikategorikan menggunakan klasifikasi dari Oladapo and Akintunde (2007) untuk menentukan kerentanan akuifer dapat dilihat pada Tabel 1.

Resistansi transversal dihitung menggunakan persamaan (Maillet, 1947; Sinha *et al.*, 2009) sebagai berikut:

$$T_R = h \cdot \rho \dots\dots\dots (3)$$

Jika terdapat “n” lapisan maka menggunakan persamaan (Oli *et al.*, 2021) sebagai berikut:

$$T_R = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i = h_1 \rho_1 + \dots + h_n \rho_n \dots\dots\dots (4)$$

di mana S adalah konduktivitas longitudinal (mhos), T_R adalah resistansi transversal (Ωm^2), h adalah ketebalan lapisan (m), dan ρ adalah resistivitas lapisan (Ωm).

Nilai koefisien anisotropi diperoleh menggunakan persamaan (Yusuf and Abiye, 2019; Zohdy *et al.*, 1974) sebagai berikut:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}} = \sqrt{\frac{\frac{T_r}{H}}{\frac{H}{S}}} = \frac{\sqrt{S \cdot T_r}}{H} \dots\dots\dots (5)$$

di mana λ adalah koefisien anisotropi, ρ_t adalah resistivitas transversal, ρ_L adalah resistivitas longitudinal, dan H adalah ketebalan total.

Konduktivitas hidrolik diperoleh dari persamaan hasil fungsi *power* antara konduktivitas hidrolik hasil uji pemompaan dan resistivitas akuifer (ρ) seperti yang dilakukan oleh Heigold *et al.* (1979). Pendekatan ini dilakukan karena Pulau Ternate tersusun atas endapan permukaan dan endapan Gunungapi Gamalama, yang memiliki karakteristik geologi yang berbeda sehingga dapat mempengaruhi karakteristik akuifer di lokasi tersebut. Dari hal tersebut, digunakan persamaan konduktivitas hidrolik sebagai berikut:

$$K_p = 1436.5 \rho^{-0.769} \dots\dots\dots (6)$$

$$K_g = 936.77 \rho^{-0.923} \dots\dots\dots (7)$$

Persamaan (6) digunakan untuk endapan permukaan sedangkan persamaan (7) untuk endapan Gunungapi Gamalama. Untuk transmisivitas (T) dihitung menggunakan persamaan (Niwas and Singhal, 1981) sebagai berikut:

$$T = K \cdot h \dots\dots\dots (8)$$

Tabel 1. Klasifikasi kapasitas perlindungan akuifer (Oladapo and Akintunde (2007)

Klasifikasi	Konduktansi Longitudinal (Siemens)	Penilaian Kapasitas Perlindungan
I	< 0,1	Buruk
II	0,1–0,19	Lemah
III	0,2–0,69	Sedang
IV	0,7–4,9	Bagus
V	5–10	Sangat Bagus
VI	>10	Luar Biasa

Transmisivitas dapat diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi dari Krásný (1993) untuk menentukan tingkat potensi air tanah parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Hasil perhitungan dari tiap parameter diinterpolasi menggunakan metode *kriging* untuk memperoleh distribusi spasial konduktansi longitudinal, resistansi transversal, koefisien anisotropi, konduktivitas hidrolik, dan transmisivitas di sepanjang Pulau Ternate. Sebagai metode analisis geostatistik, *kriging* menggunakan analisis variogram untuk memperkirakan nilai di lokasi yang tidak tersampel dengan memanfaatkan data dari titik sampel terdekat dan memperhitungkan autokorelasi spasialnya (Bohling, 2005). Selain itu, metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) diterapkan untuk memperoleh lokasi paling potensial berdasarkan parameter kedalaman (D), resistansi transversal (T_R), koefisien anisotropi (λ), konduktivitas hidrolik (K) dan transmisivitas (T). Metode AHP menggunakan penilaian subjektif terhadap tingkat kepentingan relatif masing – masing parameter sehingga dapat ditentukan parameter mana yang memiliki prioritas tertinggi dalam memengaruhi suatu permasalahan. Metode tersebut dilakukan

dengan menyusun matriks perbandingan berpasangan antar parameter, normalisasi matriks, dan perhitungan vektor eigen untuk memperoleh bobot akhir yang konsisten. Nilai Consistency Rasio (CR) pada Tabel 3 menunjukkan nilai <0.1 , yang berarti parameter yang digunakan memiliki penilaian yang konsisten (Shinde *et al.*, 2024).

Nilai parameter resistansi transversal, koefisien anisotropi, konduktivitas hidrolik dan transmisivitas kemudian dilakukan sistem *ranking*, yang ditunjukkan oleh Tabel 4, untuk memperoleh nilai groundwater potential index (GWPI) menggunakan persamaan berikut:

$$GWPI = T_{R(W)} \cdot T_{R(R)} + \lambda_{(W)} \cdot \lambda_{(R)} + K_{(W)} \cdot K_{(R)} + T_{(W)} \cdot T_{(R)} + D_{(W)} \cdot D_{(R)} \dots (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data VES menunjukkan distribusi kurva *sounding*, yaitu pada Tabel 5. Selain itu, Pulau Ternate diidentifikasi memiliki 2 jenis akuifer, yaitu akuifer tertekan dan akuifer bebas (Daud *et al.*, 2022b; Purnomo and Wiyono, 2009). Akuifer tersebut diidentifikasi tersusun dari satuan batuan endapan piroklastik,

Tabel 2. Klasifikasi nilai transmisivitas (Krásný, 1993)

Klasifikasi	Nilai Transmisivitas (m ² /hari)	Tingkat Potensi Akuifer	Potensi Penyediaan Air Tanah
I	> 1000	Sangat tinggi	Pengambilan air untuk kepentingan regional yang besar
II	100 – 1000	Tinggi	Pengambilan air dengan kepentingan regional yang lebih kecil
III	10 – 100	Sedang	Pengambilan air untuk penyediaan air lokal (komunitas kecil, pabrik, dll.)
IV	1 – 10	Rendah	Pengambilan air untuk penyediaan air lokal (konsumsi pribadi, rumah tangga, dll.)
V	0,1 - 1	Sangat rendah	Pengambilan air untuk penyediaan air lokal dengan konsumsi terbatas
VI	<0,1	Tidak Memadai	Penyediaan air untuk kebutuhan lokal sulit (jika memungkinkan) dilakukan

Tabel 3. Perbandingan berpasangan dari parameter yang dianalisis untuk potensi air tanah

Parameter	T_R	λ	K	T	D	Bobot	CR
T_R	1	2	0,33	0,25	0,5	0,11	
λ	0,5	1	0,33	0,25	0,5	0,08	
K	3	3	1	0,5	2	0,26	0,026
T	4	4	2	1	2	0,39	
D	2	2	0,5	0,5	1	0,17	

Pemetaan Kerentanan Akuifer dan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate
Berdasarkan Metode Vertical Electrical Sounding dan Parameter Hidrogeologi

Tabel 4. Pembobotan parameter akuifer untuk potensi air tanah menggunakan metode AHP (Analytical Hierarchy Process)

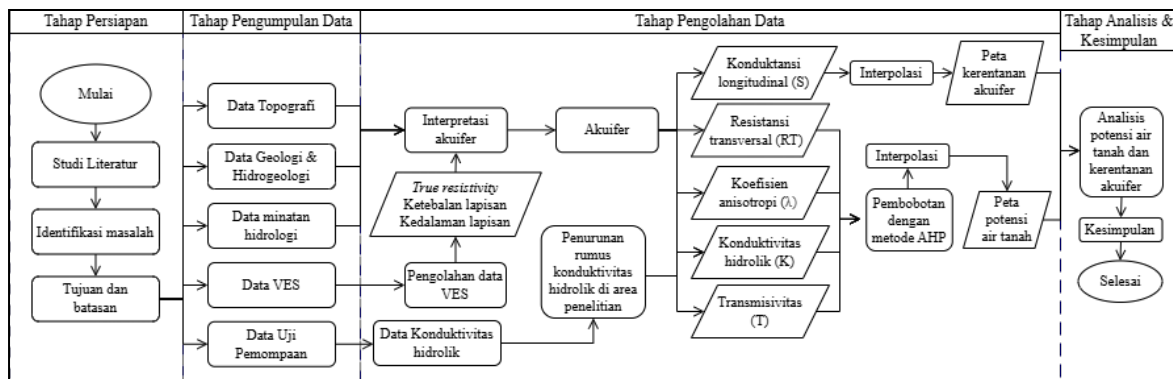
Parameter	Kriteria	Peringkat	Bobot
Resistansi Transversal (modifikasi dari Eyankware & Aleke (2021))	$\leq 2000 \Omega\text{m}^2$	1	0,11
	$2000 - 4\,000 \Omega\text{m}^2$	2	
	$4000 - 6000 \Omega\text{m}^2$	3	
	$6000 - 8000 \Omega\text{m}^2$	4	
	$8000 - 10000 \Omega\text{m}^2$	5	
	$10000 - 12000 \Omega\text{m}^2$	6	
	$12000 - 14000 \Omega\text{m}^2$	7	
	$14000 - 16000 \Omega\text{m}^2$	8	
	$>16000 \Omega\text{m}^2$	9	
Koefisien anisotropi (M.A. Yusuf and Abiye, 2019)	$\leq 1,0$	2	0,08
	$1,0 - 1,5$	3	
	$>1,5$	1	
Konduktivitas Hidrolik (modifikasi dari Opara et al., 2021)	$\leq 15 \text{ m/hari}$	1	0,26
	$15 - 30 \text{ m/hari}$	2	
	$30 - 45 \text{ m/hari}$	3	
	$45 - 60 \text{ m/hari}$	4	
	$60 - 75 \text{ m/hari}$	5	
	$> 75 \text{ m/hari}$	6	
Transmisivitas (Krásný, 1993)	$\leq 0,1 \text{ m}^2/\text{hari}$	1	0,39
	$0,1 - 1 \text{ m}^2/\text{hari}$	2	
	$1 - 10 \text{ m}^2/\text{hari}$	3	
	$10 - 100 \text{ m}^2/\text{hari}$	4	
	$100 - 1000 \text{ m}^2/\text{hari}$	5	
Kedalaman (modifikasi dari Mogaji & Omobude (2017))	$> 1000 \text{ m}^2/\text{hari}$	6	0,17
	$\leq 5 \text{ m}$	4	
	$5 - 20 \text{ m}$	3	
	$10 - 50 \text{ m}$	2	
	$> 50 \text{ m}$	1	

Tabel 5. Distribusi kurva *sounding* resistivitas

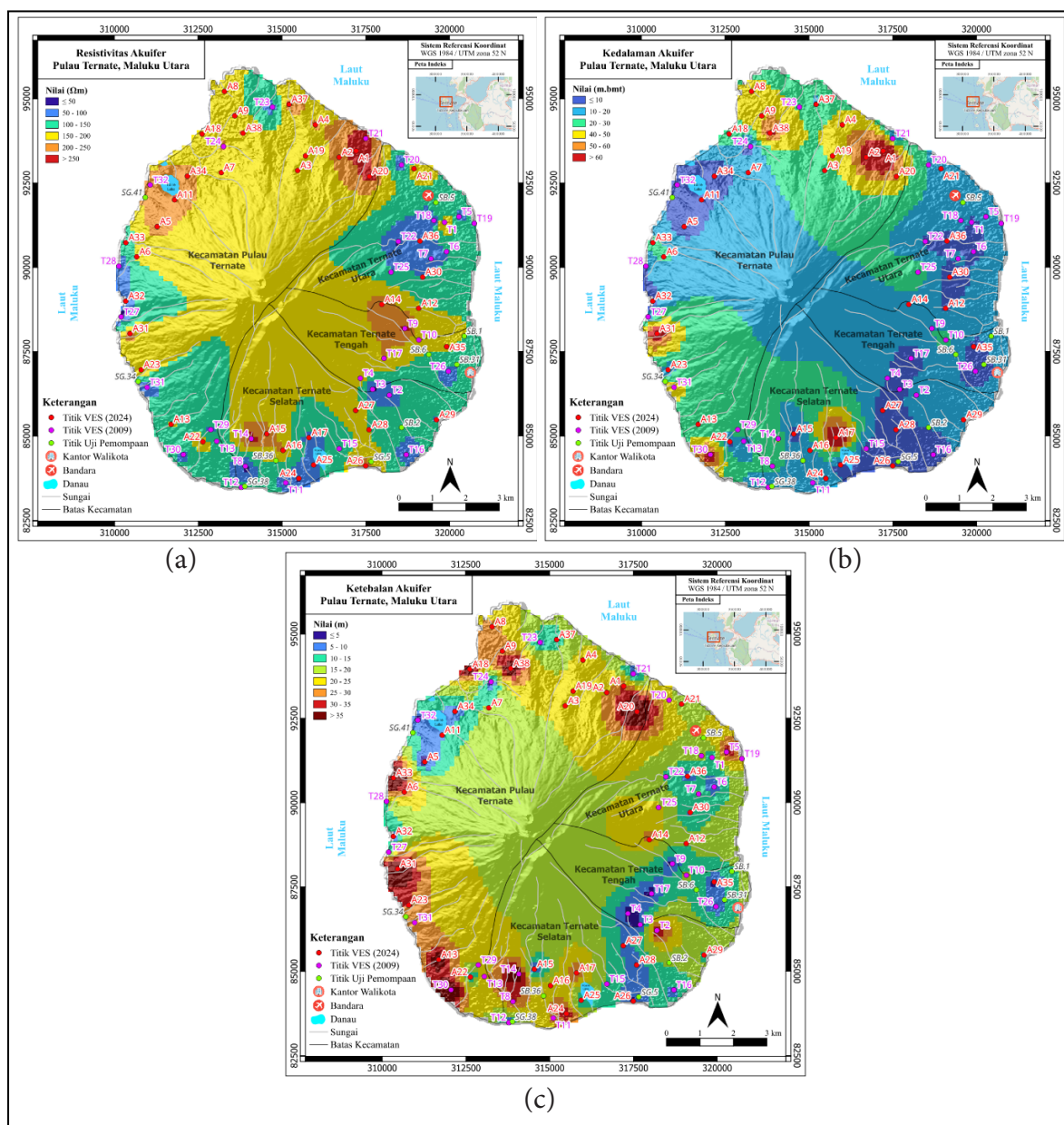
Distribusi Resistivitas	Tipe Kurva	Frekuensi
$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	Tipe K	20
$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	Tipe A	15
$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	Tipe H	13
$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	Tipe Q	3
$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	Tipe KH	18

breksi vulkanik atau lava lapuk (Daud *et al.*, 2022b; Dumont *et al.*, 2024; Fadillah, 2023) serta memiliki rentang resistivitas $30 - 300 \Omega\text{m}$ dengan ketebalan $0,99 - 59,3 \text{ m}$ dan kedalaman $0,5 - 97,6 \text{ mbmt}$ (meter di bawah muka tanah),

ditunjukkan oleh Gambar 4. Titik A2, A3, A7, A9, dan A19 tersusun atas resistivitas tinggi dan tidak berkorelasi dengan sumur atau sumber air terdekat sehingga tidak ditemukan indikasi keberadaan akuifer sedangkan titik T19 diiden-

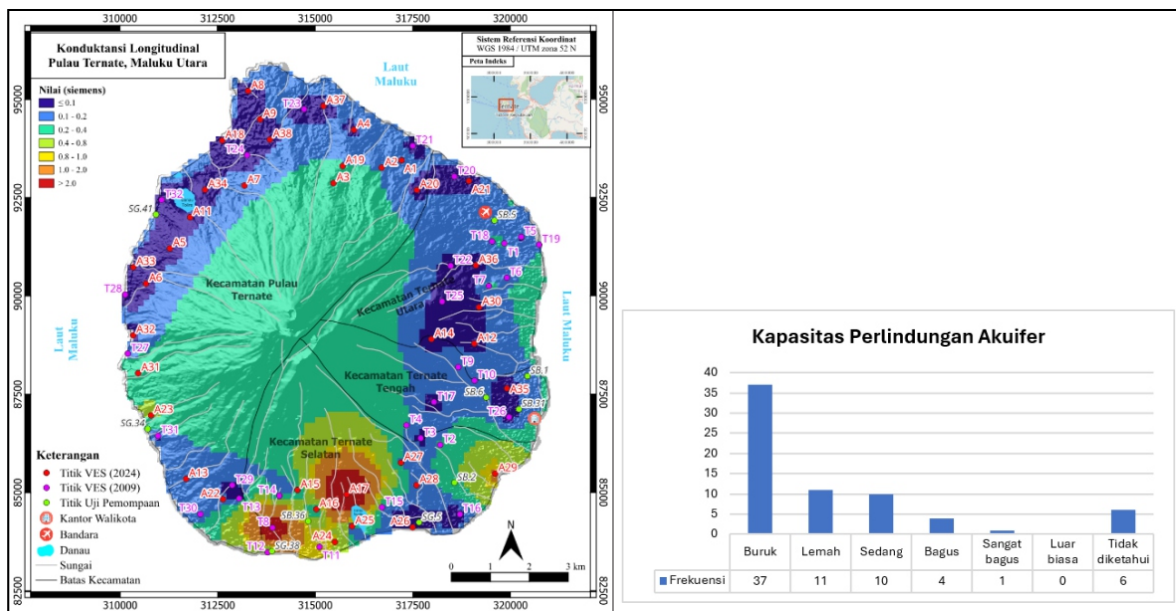


Gambar 3. Diagram alir penelitian



Gambar 4. Peta sebaran (a) resistivitas, (b) kedalaman, dan (c) ketebalan akuifer di lokasi penelitian.

Pemetaan Kerentanan Akuifer dan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate Berdasarkan Metode Vertical Electrical Sounding dan Parameter Hidrogeologi



Gambar 5. (a) Peta sebaran nilai konduktansi longitudinal lapisan di atas akuifer dan (b) penilaian kapasitas perlindungan akuifer titik VES pada lokasi penelitian.

tifikasi terpengaruh oleh intrusi air laut sehingga sulit mengetahui letak akuifernya.

Konduktansi longitudinal digunakan untuk menentukan kapasitas perlindungan atau *aquifer protective capacity* (APC) terhadap kontaminasi dari permukaan. Kapasitas perlindungan akuifer adalah kemampuan medium bumi untuk memperlambat dan menghentikan fluida perkolasi (Olorunfemi *et al.*, 1999). Umumnya, parameter tersebut digunakan untuk menentukan tingkat kerentanan akuifer (Opara *et al.*, 2023). Dari Tabel 6, diketahui konduktansi longitudinal lapisan penutup akuifer di Pulau Ternate memiliki nilai 0,000731 – 5,96 siemens sedangkan dari Gambar 5 (a) diketahui sebagian besar nilai konduktansi longitudinal lapisan penutup akuifer di lokasi penelitian memiliki nilai < 0,2 siemens. Nilai tersebut mendominasi hampir di seluruh lokasi penelitian sedangkan hanya wilayah selatan lokasi penelitian yang memiliki nilai konduktansi longitudinal yang lebih tinggi. Berdasarkan klasifikasi dari Oladapo and Akintunde (2007), titik dengan kategori buruk mencakup hampir 54% atau 37 titik dari total titik VES, ditunjukkan oleh Gambar 5 (b).

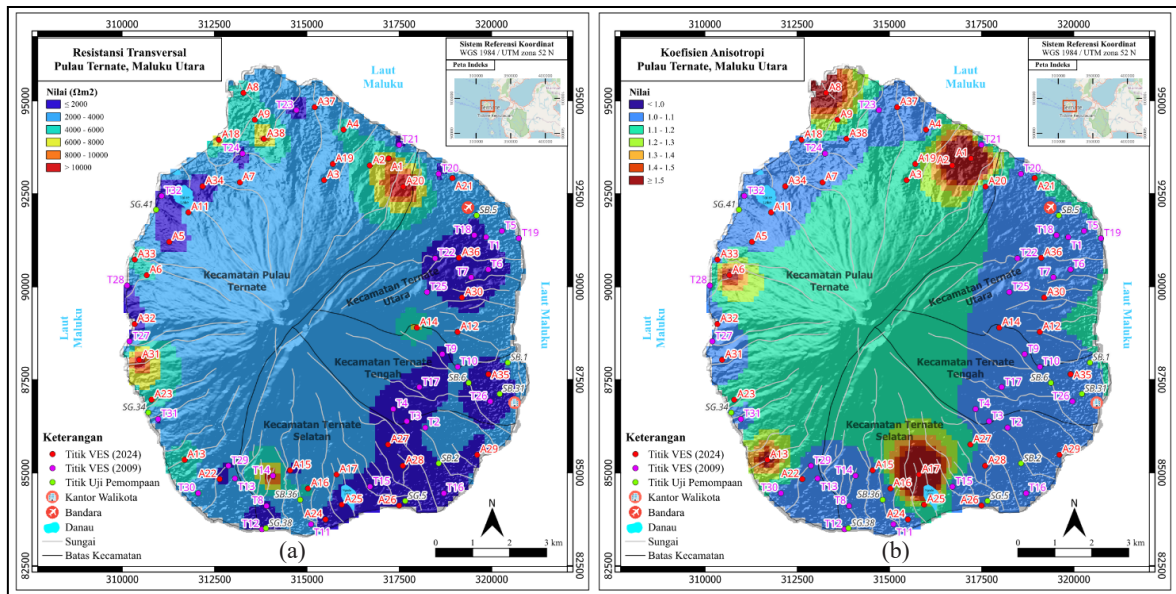
Resistansi transversal menggambarkan seberapa besar suatu lapisan secara keseluruhan menghambat aliran arus listrik yang mencoba menembusnya dari atas ke bawah atau sebaliknya. Resistansi transversal akuifer di lokasi penelitian memiliki nilai 92,5 – 16790 Ωm^2 , ditunjukkan oleh Tabel 6. Dari Gambar 6 (a) diketahui nilai resistansi transversal akuifer yang tinggi di wilayah utara, timur laut, dan barat daya lokasi penelitian. Parameter resistansi transversal memiliki hubungan berbanding lurus dengan transmisivitas sehingga ketika resistansi transversal akuifer tinggi maka tingkat transmisivitas di akuifer juga tinggi (Eyankware and Aleke, 2021; Kelly, 1977; Niwas and Singhal, 1981). Namun, interpretasi nilai resistansi transversal masih memiliki ambiguitas, seperti hasil metode geofisika lainnya karena perbedaan lokasi dan kondisi geologi seperti di wilayah vulkanik.

Hasil perhitungan koefisien anisotropi di lokasi penelitian memiliki nilai 1,0 - 3,2, ditunjukkan oleh Tabel 6. Selain itu, Gambar 6 (b) menunjukkan bahwa mayoritas lokasi penelitian memiliki nilai anisotropi akuifer sebesar 1,0, yang berarti resistivitas dan ketebalan lapisan

Tabel 6. Hasil perhitungan parameter akuifer

Titik	Resistivitas akuifer (Ωm)	Kedalaman akuifer (m)	Ketebalan akuifer (m)	Konduktansi longitudinal lapisan di atas akuifer (S)	Resistansi transversal akuifer (Ωm^2)	Koefisien anisotropi akuifer	Konduktivitas Hidrolik (m/hari)	Transmisivitas (m^2/hari)
A1	293	30	97,6	0,16053	28185,1	3,21	4,95	148,54
A2	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	-	-	-	-	-	-	-	-
A4	204	22,91	40,23	0,05589	4673,6	1	6,92	158,44
A5	235	0,99	0,5	0,00097	232,7	1	6,07	6,01
A6	172	30,32	23,22	0,04725	7374,9	1,74	8,10	245,45
A7	-	-	-	-	-	-	-	-
A8	173,5	28,3	38	0,01857	9750,6	2,18	8,03	227,27
A9	-	-	-	-	-	-	-	-
A11	256	8,96	7,56	0,02116	2293,8	1	5,61	50,25
A12	157,3	15,49	8,38	0,02133	1495,6	1	8,79	136,18
A13	155,5	40,65	21,6	0,10998	8635,2	1,66	8,89	361,18
A14	245	28	16	0,01205	6860,0	1	5,84	163,53
A15	225	1,5	2,06	0,22242	337,5	1	6,32	9,48
A16	209,5	23,5	10	0,09909	4760,5	1,03	6,75	158,58
A17	68,15	31,6	81,8	5,96061	6402,1	2,86	19,03	601,22
A18	179	43,1	29,7	0,00374	7708,7	1,07	7,80	336,30
A19	-	-	-	-	-	-	-	-
A20	292	57,5	42	0,04187	16790,0	1	4,97	285,60
A21	195	17,72	11,2	0,01846	3601,4	1,10	24,90	441,30
A22	199	7,01	5,58	0,13178	1408,3	1,05	7,08	49,60
A23	196,5	31,6	12,5	0,50764	6962,1	1,14	7,16	226,23
A24	35,5	35,9	19,4	0,93454	1274,5	1	92,30	3313,40
A25	83,1	9,15	2,2	0,01879	875,6	1,24	15,84	144,96
A26	238	2,2	1,44	0,00677	523,6	1	6,00	13,20
A27	198,5	8,23	2,7	0,16307	1701,2	1,13	7,09	58,37
A28	149,3	3,38	4,36	0,12995	504,6	1	30,58	103,36
A29	95,5	13,9	11,06	1,26173	1327,5	1	43,12	599,37
A30	95,65	8,51	3,01	0,02627	797,6	1,07	43,07	366,51
A31	220	59,3	68,4	0,29083	13046,0	1	6,45	382,50
A32	68,7	5,42	5,04	0,04991	372,4	1	18,89	102,36
A33	106	58,6	23,4	0,03724	6211,6	1	12,66	741,61
A34	222,5	4,27	1,02	0,00279	984,9	1,03	6,38	27,26
A35	165	2,96	5,91	0,02687	488,4	1	28,32	83,82
A36	65,9	7,19	5,05	0,00831	473,8	1	57,36	412,39
A37	235	11,9	18,5	0,04736	2796,5	1	6,07	72,22
A38	203,5	46,5	56,2	0,04300	9793,5	1,07	6,93	322,32
T1	245,3	9,091	7,302	0,20873	2230,0	1	5,83	53,03
T2	66,95	36,8	18,29	0,23592	2463,8	1	56,66	2085,22
T3	32,9	2,813	3,795	0,04635	92,5	1	97,85	275,27
T4	196,8	1,386	10,25	0,21156	272,8	1	7,15	9,91
T5	71,17	34,901	12,28	0,07428	1960,1	1,07	54,06	1886,81
T6	95,44	4,62	6,474	0,17830	440,9	1	43,14	199,31
T7	67,99	15,15	11,89	0,21158	1030,0	1	56,00	848,34
T8	30	31,54	26,63	4,06662	946,2	1	40,57	1279,71
T9	273,9	2,575	19,87	0,20170	705,3	1	19,18	49,38
T10	163	16,8	24,12	0,12690	2738,4	1	28,58	480,22
T11	80,6	26,6	13,96	0,98598	2144,0	1	49,13	1306,82
T12	117,1	4,669	8,5	0,30830	546,7	1	36,86	172,11
T13	110	24,38	13,64	0,03713	2681,8	1	12,23	298,17
T14	278	46,68	30,58	0,11064	12977,0	1	5,20	242,61
T15	103,6	14,04	1,88	0,15994	1454,5	1	40,50	568,67
T16	54,56	7,12	1,208	0,00151	388,5	1	66,32	472,20
T17	200,7	1,437	2,001	0,02478	288,4	1	7,02	10,09
T18	42,1	17,97	15,52	0,20050	756,5	1	29,68	533,30
T19	-	-	-	-	-	-	-	-
T20	37,77	21,68	18,6	0,03284	818,9	1	32,80	711,19
T21	300	4,439	12,48	0,02948	1333,5	1	4,84	21,48
T22	39,35	13,69	7,164	0,02121	538,7	1	31,59	432,42
T23	60,2	8,5	28,9	0,03668	511,7	1	21,33	181,34
T24	205,7	2,712	4,586	0,00339	557,9	1	6,86	18,61
T25	99,86	20,63	28,39	0,00445	2060,1	1	13,37	275,86
T26	65,72	4,509	2,867	0,01380	296,3	1	57,48	259,17
T27	32	13,59	10,09	0,17026	434,9	1	99,96	1358,52
T28	48,9	14,6	8,311	0,03538	713,9	1	25,85	377,36
T29	80,27	19,86	32,37	0,07541	1594,2	1	16,36	324,87
T30	83,24	50,89	60,72	0,12642	4236,1	1	15,82	805,01
T31	53,74	29,35	39,21	0,05004	1577,3	1	23,69	695,31
T32	241,8	2,796	0,741	0,00073	676,1	1	5,91	16,53

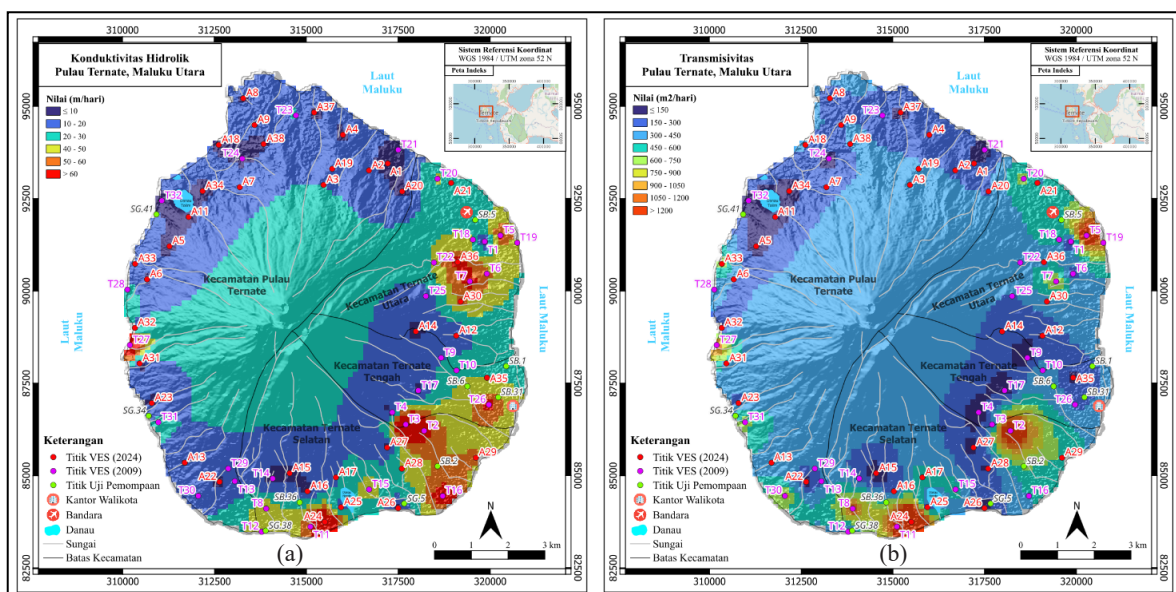
Pemetaan Kerentanan Akuifer dan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate Berdasarkan Metode Vertical Electrical Sounding dan Parameter Hidrogeologi



Gambar 6. Peta sebaran (a) resistansi transversal dan (b) koefisien anisotropi di lokasi penelitian.

akuifer tidak memiliki perbedaan yang mencolok antara arah vertikal dan horizontal. Lokasi penelitian dapat dipertimbangkan memiliki zona potensi air tanah karena memiliki nilai koefisien anisotropi 1,0 - 1,5 (Yusuf dan Abiye, 2019). Peningkatan nilai anisotropi ($>1,5$) dapat disebabkan oleh adanya batuan kompak sehingga dikaitkan dengan daerah yang memiliki porositas dan permeabilitas rendah. Oleh karena itu, daerah dengan nilai anisotropi tinggi dianggap

kurang berpotensi untuk eksplorasi air tanah. Sebaliknya, nilai anisotropi yang relatif rendah mengindikasikan terdapat zona dengan porositas dan permeabilitas tinggi, yang disebabkan oleh adanya rekahan pada lapisan batuan di kedalaman tertentu (Keller dan Frischknecht, 1966). Hasil perhitungan pada Tabel 6 menunjukkan lokasi penelitian memiliki nilai konduktivitas hidroluk sekitar 4.8 – 100.0 m/hari. Konduktivitas hidrolik menunjukkan kecepatan aliran air



Gambar 7. Peta sebaran (a) konduktivitas hidrolik dan (b) transmisivitas di lokasi penelitian.

tanah melalui medium berpori di bawah gradien hidrolik. Selain itu, parameter ini digunakan sebagai indikator keberadaan zona berpori dan retakan pada batuan, yang memungkinkan air tanah mengalir di dalamnya (Ossai *et al.*, 2023). Gambar 7 (a) menunjukkan wilayah timur hingga selatan lokasi penelitian memiliki konduktivitas hidrolik yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya sedangkan wilayah utara memiliki nilai yang paling rendah.

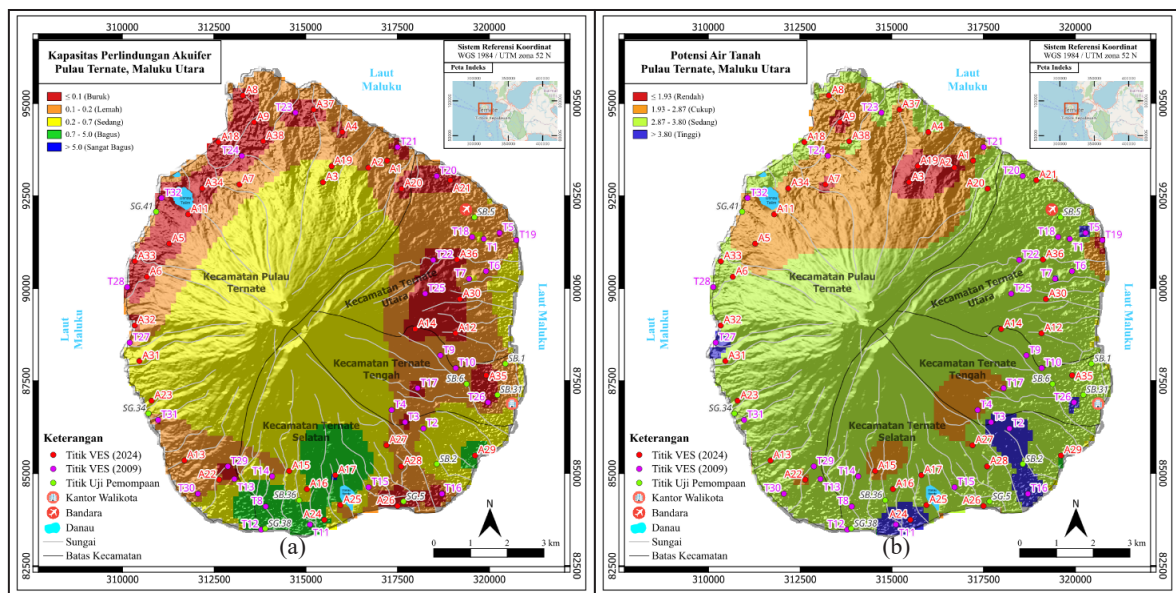
Hasil perhitungan pada Tabel 6 menunjukkan transmisivitas di lokasi penelitian memiliki nilai yang bervariasi, yaitu 6 – 3313 m²/hari. Parameter ini menggambarkan kemampuan akuifer untuk mentransmisikan air yang ke seluruh ketebalan jenuh pada kondisi di bawah gradien hidrolik. Dari Gambar 7 (b) diketahui beberapa area di wilayah timur hingga selatan lokasi penelitian memiliki nilai transmisivitas yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya sedangkan wilayah utara dan lereng tenggara memiliki nilai yang paling rendah. Berdasarkan klasifikasi Krásný (1993), 6 titik memiliki kategori potensi air tanah yang sangat tinggi, 41 titik termasuk tinggi, 13 titik termasuk sedang, 3 titik termasuk rendah dan 6 titik tidak memadai karena tidak ditemukan adanya akuifer.

Dari analisis konduktansi longitudinal, sebagian besar lokasi penelitian memiliki kapasitas perlindungan akuifer yang buruk hingga lemah. Kapasitas perlindungan akuifer yang buruk menyebabkan akuifer di Pulau Ternate rentan terkena kontaminasi dari permukaan. Hal tersebut disebabkan karena lapisan penutup akuifer yang tipis menyebabkan kontaminan dari permukaan yang meresap ke dalam tanah akan cepat mencapai akuifer (Oni *et al.*, 2017). Hanya 5 titik dari 69 titik yang memiliki kapasitas perlindungan akuifer yang baik hingga sangat baik, yaitu titik A17, A24, A29, T8 dan T11. Titik – titik tersebut memiliki lapisan di atas akuifer yang tebal, sehingga menyebabkan waktu yang dibutuhkan kontaminan untuk meresap akan semakin lama (Oni *et al.*, 2017). Selain lapisan di atas akuifer yang tebal, kapasitas perlindungan akuifer yang tinggi juga disebabkan oleh nilai resistivitas

lapisan yang tinggi. Resistivitas yang tinggi umumnya dimiliki oleh batuan kompak, seperti batuan beku, batuan vulkanik, atau batuan metamorf. Batuan tersebut memiliki sifat kedap air sehingga fluida atau kontaminan tidak dapat menembus lapisan batuan tersebut (Selley, 2005). Selain itu, resistivitas rendah yang berhubungan dengan keberadaan lapisan lempung dapat menahan infiltrasi zat pencemar dari permukaan dan memperpanjang waktu tempuh kontaminan untuk mencapai zona akuifer. Dari Gambar 8 (a), wilayah selatan lokasi penelitian memiliki kapasitas perlindungan yang baik atau dapat disebut memiliki kerentanan akuifer yang rendah.

Parameter kedalaman, resistansi transversal, koefisien anisotropi, konduktivitas hidrolik dan transmisivitas diintegrasikan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk memperoleh peta potensi air tanah di lokasi penelitian. Nilai indeks potensi air tanah yang diperoleh dari metode tersebut dibuat peta sebaran potensi air tanah yang ditunjukkan oleh Gambar 8 (b). Dari peta tersebut diketahui bahwa wilayah tenggara dan selatan lokasi penelitian memiliki potensi air tanah yang relatif lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Hasil ini mirip dengan hasil dari Purnomo and Wiyono (2009) yang menyebutkan bahwa wilayah timur hingga selatan memiliki potensi air tanah tinggi pada akuifer tertekan dan tinggi – sedang pada akuifer bebas. Wilayah tenggara hingga selatan memiliki ketebalan relatif lebih besar. Akuifer yang lebih tebal tidak hanya menyediakan penyimpanan air yang lebih besar tetapi juga meningkatkan transmisivitas (Heath, 1983). Nilai ketebalan ini juga mempengaruhi perhitungan nilai resistansi transversal. Nilai resistansi transversal yang lebih tinggi dipertimbangkan memiliki potensi air tanah yang tinggi. Resistansi transversal memiliki hubungan berbanding lurus dengan transmisivitas (Eyankware and Aleke, 2021). Selain itu, mayoritas nilai koefisien anisotropi akuifer di Pulau Ternate memiliki nilai 1 – 1.5 dimana pada rentang nilai tersebut dapat dipertimbangkan sebagai zona potensi air tanah (M. A. Yusuf and Abiye, 2019).

Pemetaan Kerentanan Akuifer dan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate Berdasarkan Metode Vertical Electrical Sounding dan Parameter Hidrogeologi



Gambar 8. Peta sebaran (a) kapasitas perlindungan akuifer dan (b) potensi air tanah di lokasi penelitian

Wilayah tenggara dan selatan juga memiliki konduktivitas hidrolik dan transmisivitas yang lebih tinggi. Kondisi tersebut biasanya berkaitan dengan tingkat aliran dan *recharge* hidrolik yang lebih tinggi (Oli *et al.*, 2021) serta menunjukkan lapisan pembawa air di suatu wilayah memiliki tingkat permeabilitas dan porositas akuifer yang baik (Eyankware and Aleke, 2021).

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat diperoleh kesimpulan bahwa parameter geolistrik dan hidrogeologi di lokasi penelitian menunjukkan nilai hasil perhitungan, yaitu resistivitas akuifer 30 – 300 Ωm , ketebalan 1,0 – 59,3 m, kedalaman 0,5 – 97,6 mbmt, konduktansi longitudinal 0.00073 – 5,96 siemens, resistansi transversal 92,5 – 16790 Ωm^2 , koefisien anisotropi 1,0 – 3,2, konduktivitas hidrolik 4,8 – 100,0 m/hari, dan transmisivitas 6 – 3313 m^2/hari . Selain itu, sebagian besar lokasi penelitian memiliki kerentanan akuifer yang tinggi sedangkan wilayah selatan lokasi penelitian memiliki nilai kerentanan akuifer yang rendah. Lokasi penelitian juga memiliki potensi air tanah yang rendah hingga sangat tinggi, di mana wilayah tenggara dan selatan lokasi penelitian memiliki potensi air tanah yang lebih

besar sedangkan wilayah utara memiliki potensi air yang lebih rendah. Dari kondisi tersebut diketahui wilayah selatan lokasi penelitian memiliki kerentanan akuifer yang rendah dan potensi air tanah yang tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada para pembimbing akademik di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas bimbingan, pengetahuan, dan waktu yang diberikan selama proses penulisan makalah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para pembimbing lapangan di Laboratorium Geofisika, Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan atas akses data penelitian, fasilitas teknis, dan masukan berharga selama penulisan naskah ini. Penulis juga sangat berterimakasih atas masukan dan saran dari semua pihak telah berperan penting dalam memastikan penyelesaian penelitian ini dengan sukses.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulrazzaq, Z.T., Al-Ansari, N., Aziz, N.A., Agbasi, O.E., Etuk, S.E., 2020. *Estimation*

- of main aquifer parameters using geoelectric measurements to select the suitable wells locations in Bahr Al-Najaf depression, Iraq.* Groundwater for Sustainable Development, Vol. 11, pp. 100437. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100437>
- Akinseye, V.O., Osisanya, W.O., Eyankware, M.O., Korode, I.A., Ibitoye, A.T., 2023. *Application of second-order geoelectric indices in determination of groundwater vulnerability in hard rock terrain in SW. Nigeria.* Sustainable Water Resources Management, Vol. 9, pp. 169. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00936-w>
- Asfahani, J., 2013. *Groundwater potential estimation using vertical electrical sounding measurements in the semi-arid Khanasser Valley region, Syria.* Hydrological Sciences Journal, Vol. 58, pp. 468–482. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.751109>
- Bohling, G., 2005. *Introduction to Geostatistics and Variogram Analysis.* Kansas Geological Survey, Vol. 1, pp. 1–20.
- Bronto, S., Hadisantoso, R.D., Lockwook, J.P., 1982. *Peta Geologi Gunungapi Gamalama, Ternate, Maluku.* Pusat Vulkanologi, Mitigasi, dan Bencana Geologi (PVMBG), Bandung.
- Daud, K., Pramoedyo, H., Afandhi, A., Tama, I.P., 2022a. *Analysis of Groundwater Flow on Hydrogeological for Sustainable Development and Environment in the Ternate Basin, North Maluku Province, Indonesia.* Jurnal Pembangunan dan Alam Lestari, Vol. 13, No. 1 <https://doi.org/10.21776/ub.j-pal.2022.013.01.02>
- Daud, K., Pramoedyo, H., Afandhi, A., Tama, I.P., 2022b. *Hydrogeochemical Character And Groundwater Potential In Ternate Basin, North Maluku, Indonesia.* Journal of Southwest Jiaotong University, Vol. 57, pp. 492–503. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.57.3.40>
- Dumont, M., Plagnes, V., Lachassagne, P., Guérin, R., Nugraha, B., Mohamad, F., Oudin, L., Fadillah, A., Valdès, D., Brocard, G., Bonjour, J.-L., Saadi, M., Esneu, A.-S., Muhammad, A., Hendarmawan, Dörfliger, N., 2024. *Water cycle modelling strengthened by probabilistic integration of field data for groundwater management of a quite unknown tropical volcanic hydrosystem.* Comptes Rendus. Géoscience, Vol. 355, pp. 207–229. <https://doi.org/10.5802/crgeos.192>
- Eyankware, M.O., Aleke, G., 2021. *Geoelectric investigation to determine fracture zones and aquifer vulnerability in southern Benue Trough southeastern Nigeria.* Arabian Journal of Geosciences, Vol. 14, pp. 2259. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08542-w>
- Fadillah, A., 2023. *Hydrogeological Interpretation Using Electrical Resistivity Tomography: Methodology and Conceptual Model in Andesitic Volcanic Context.* GEOMATE, Vol. 24, pp. 25–36. <https://doi.org/10.21660/2023.106.3728>
- Heath, R.C., 1983. *Basic ground-water hydrology (No. 2220),* Water Supply Paper. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/wsp2220>
- Heigold, P.C., Gilkeson, R.H., Cartwright, K., Reed, P.C., 1979. *Aquifer Transmissivity from Surficial Electrical Methods.* Groundwater, Vol. 17, pp. 338–345. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1979.tb03326.x>
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting.* Pergamon Press, Oxford, UK.
- Kelly, W.E., 1977. *Geoelectric Sounding for Estimating Aquifer Hydraulic Conductivity.* Groundwater, Vol. 15, pp. 420–425. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1977.tb03189.x>
- Krásný, J., 1993. *Classification of transmissivity magnitude and variation.* Groundwater. Vol. 31, pp. 230–236. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb01815.x>
- Kwami, I.A., Haruna, A.I., Mukkafa, S., Maigari, A.S., Bello, A.M., Usman, M.B., Umar, A.D., Justus, I.O., Sadiq, A.M., Umar, M.A., 2023. *Delineation of aquifer systems and*

- aquifer vulnerability using geoelectrical parameters: A case study of Ashaka cement factory*. Results in Earth Sciences, Vol. 1, pp. 100003. <https://doi.org/10.1016/j.rines.2023.100003>
- 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, Vol. 17, pp. 100738. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100738>
- Maillet, R., 1947. *The Fundamental Equations of Electrical Prospecting*. Geophysics, Vol. 12, pp. 529–662. <https://doi.org/https://doi.org/10.1190/1.1437342>
- Mbinkong, R.S., Kengni, S.H.P., Ndoh, N.E., Gaetan, T.D.N., Pokam, B.P.G., Tabod, C.T., 2024. *Evaluation of groundwater potential, aquifer parameters and vulnerability using geoelectrical method: a case study of parts of the Sanaga Maritime Division, Douala, Cameroon*. Modeling Earth Systems and Environment, Vol. 10, pp. 2833–2853. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01932-x>
- Mogaji, K.A., Omobude, O.B., 2017. *Modeling of geoelectric parameters for assessing groundwater potentiality in a multifaceted geologic terrain, Ipinsa Southwest, Nigeria – A GIS-based GODT approach*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 6, pp. 434–451. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.07.001>
- Niwas, S., Singhal, D.C., 1981. *Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in porous media*. Journal of Hydrology, Vol. 50, pp. 393–399. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90082-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90082-2)
- Nugraha, G.U., Nur, A.A., Pranantya, P.A., Lubis, R.F., Bakti, H., 2023. *Analysis of groundwater potential zones using Dar-Zarrouk parameters in Pangkalpinang city, Indonesia*. Environment, Development and Sustainability, Vol. 25, pp. 1876–1898. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02103-7>
- Oladapo, M.I., Akintunde, O.M., 2007. *Hydro-geophysical Study of Ogbese Southwestern Nigeria*. Global Journal of Pure and Applied Sciences, Vol. 13, pp. 55–61.
- Olayinka, A.I., Oyedele, E.A.A., 2019. *On the Application of Coefficient of Anisotropy as an Index of Groundwater Potential in a Typical Basement Complex of Ado Ekiti, Southwest, Nigeria*. Physical Science International Journal, Vol. 22, No. 2, pp. 1–10. <https://doi.org/10.9734/psij/2019/v22i130119>
- Oli, I.C., Ahairakwem, C.A., Opara, A.I., Ekwe, A.C., Osi-Okeke, I., Urom, O.O., Udeh, H.M., Ezennubia, V.C., 2021. *Hydrogeophysical assessment and protective capacity of groundwater resources in parts of Ezza and Ikwo areas, southeastern Nigeria*. International Journal of Energy and Water Resources, Vol. 5, No. 1, pp 57–72. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00084-3>
- Olorunfemi, M.O., Ojo, J.S., Akintunde, O.M., 1999. *Hydro-geophysical evaluation of the groundwater potentials of the Akure metropolis, southwestern Nigeria*. Journal of Mining and Geology, Vol. 35, No. 2, pp. 207–228.
- Oni, T.E., Omosuyi, G.O., Akinlalu, A.A., 2017. *Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 6, No. 2, pp. 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.04.009>
- Opara, A.I., Edward, O.O.I., Eyankware, M.O., Akakuru, O.C., Oli, I.C., Udeh, H.M., 2023. *Use of geo-electric data in the determination of groundwater potentials and vulnerability mapping in the southern Benue Trough Nigeria*. International Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 20, No. 8, pp. 8975–9000. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04485-1>
- Opara, A.I., Eke, D.R., Onu, N.N., Ekwe, A.C., Akaolisa, C.Z., Okoli, A.E., Inyang, G.E., 2021. *Geo-hydraulic evaluation of aquifers of the Upper Imo River Basin, Southeastern*

- Nigeria using Dar-Zarrouk parameters. International Journal of Energy and Water Resources*, Vol. 5, pp. 259–275. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00099-w>
- Ossai, M.N., Okeke, F.N., Obiora, D.N., Ibuot, J.C., 2023. *Evaluation of groundwater repositories in parts of Enugu, Eastern Nigeria via electrical resistivity technique. Applied Water Science*, Vol. 13, No. 2, pp. 64. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01839-5>
- Oyeyemi, K.D., Aizebeokhai, A.P., Sanuade, O.A., 2019. *Geological-geophysical investigations for hydrological studies in a basement complex terrain, Southwestern Nigeria*, in: *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources. Presented at the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1)*, Springer International Publishing., Tunisia, pp. 241–244. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5_58
- Purnomo, B.J., Wiyono, 2009. *Peta Potensi Air Tanah Cekungan Air Tanah (CAT) Ternate, Maluku*. Pusat Lingkungan Geologi, Bandung.
- Raju, R.S., Raju, G.S., Rajasekhar, M., 2023. *A study on hydro-geological characterization through Dar-Zarrouk parameters in hard rock terrain of Mandavi River Basin, Andhra Pradesh, India. Arab Journal Geoscience*, Vol. 16, No. 8, pp. 453. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11573-0>
- Selley, R.C., 2005. *Rock and Their Classification*, in: *Encyclopedia of Geology*. Elsevier, London, pp. 452–455.
- Shinde, S.P., Barai, V.N., Gavit, B.K., Kadam, S.A., Atre, A.A., Pande, C.B., Pal, S.C., Radwan, N., Tolche, A.D., Elkhachy, I., 2024. *Assessment of groundwater potential zone mapping for semi-arid environment areas using AHP and MIF techniques. Environmental Sciences Europe*, Vol. 36, No. 3, pp. 87. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00906-9>
- Sinha, R., Israil, M., Singhal, D.C., 2009. *A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters of anisotropic aquifers. Hydrogeology Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 495–503. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0424-9>
- Sudadi, P., 2004. *Peta Hidrogeologi Pulau Ternate, Provinsi Maluku Utara*. Pusat Lingkungan Geologi, Bandung.
- Thaib, F., Lating, A., Suaib, R., Pora, R., 2021. *Dilema Air Bersih di Kota Pulau (Studi Efektivitas Pelayanan Air Bersih Di PDAM Kota Ternate)*. Jurnal Sains, Sosial, dan Humaniora (JSSH), Vol. 1, No. 2, pp. 51–59.
- Yusuf, M. A., Abiye, T.A., 2019. *Risks of groundwater pollution in the coastal areas of Lagos, southwestern Nigeria. Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 9, pp. 100222. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100222>
- Zohdy, A.A.R., Eaton, G.P., Mabey, D.R., 1974. *Application of surface geophysics to ground-water investigations, Techniques of Water-Resources Investigations*. U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey : U.S. Govt. Print. Off.,. <https://doi.org/10.3133/twri02D1>