JLBG

JURNAL LINGKUNGAN DAN BENCANA GEOLOGI
Journal of Environment and Geological Hazards

ISSN: 2086-7794, e-ISSN: 2502-8804
Akreditasi KEMENRISTEK-BRIN No. 200/M/KPT/2020
Berlaku sampai Volume 16 Nomor 1 Tahun 2025
e-mail: perpustakaan.pag@esdm.go.id - http://jlbg.geologi.esdm.go.id/index.php/jlbg

Pemetaan Potensi Air Tanah di Pesisir Pulau Ternate Menggunakan Model GODT (*Groundwater Confinement, Overlying Lithology Resistivity, Depth to Aquifer,* dan *Thickness of Aquifer*)

Groundwater Potential Mapping in the Coastal Area of Ternate Island Using the Groundwater Confinement, Overlying Lithology Resistivity, Depth to Aquifer, and Thickness of Aquifer (GODT) Model

Alifatul Nur Rohmah Maula[1], Wiyono[2], Acep Ruchimat[2], Juan Pandu Gya Nur Rochman[1], dan M. Haris Miftakhul Fajar[1]

[1]Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
[2]Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung

e-mail: alifatulnurrohmah01@gmail.com
Naskah diterima 2 April 2025, selesai direvisi 30 Juni 2025 dan disetujui 15 Agustus 2025

ABSTRAK

Air tanah merupakan salah satu sumber air tawar utama di Pulau Ternate, tetapi keberadaannya sulit dipetakan secara konsisten karena sistem akuifer vulkanik yang heterogen dan keterbatasan informasi bawah permukaan. Kondisi tersebut menyulitkan identifikasi zona dengan karakteristik akuifer yang mendukung potensi air tanah, sehingga diperlukan pendekatan yang mengintegrasikan beberapa parameter hidrogeologi secara spasial. Penelitian ini bertujuan memetakan potensi air tanah menggunakan model *Groundwater Confinement, Overlying Lithology Resistivity, Depth to Aquifer, and Thickness of Aquifer* (GODT) serta membandingkan kinerja dua pendekatan pembobotan, yaitu pembobotan berbasis literatur (GODT-MCDA) dan *Analytical Hierarchy Process* (GODT-AHP). Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan hasil inversi geolistrik 1-D dari 37 titik pengukuran dengan data 58 sumur untuk memperoleh parameter GODT dan *Groundwater Potential Index* (GWPI), yang kemudian dibandingkan dengan *Well Water Column Thickness* (WWCT). Hasil menunjukkan bahwa GODT-MCDA memiliki kesesuaian lebih tinggi terhadap kondisi air tanah lapangan (R = 0.73) dibandingkan GODT-AHP (R = 0.62), yang menunjukkan bahwa pembobotan berbasis literatur lebih konsisten dalam merepresentasikan karakteristik hidrogeologi daerah penelitian. Dengan demikian, GODT-MCDA lebih sesuai digunakan untuk pemetaan awal potensi air tanah di lingkungan vulkanik Pulau Ternate, sedangkan GODT-AHP dapat menjadi pendekatan alternatif untuk mengevaluasi pengaruh prioritas parameter terhadap hasil pemetaan. Hasil penelitian ini dapat menjadi informasi awal untuk mendukung identifikasi zona prioritas dalam eksplorasi dan pengelolaan air tanah tanpa menginterpretasikan GWPI sebagai ukuran langsung produktivitas akuifer.

Kata kunci: Geolistrik 1-D, GODT, Potensi air tanah, Multikriteria, AHP

ABSTRACT

Groundwater is one of the main freshwater resources on Ternate Island, but its occurrence is difficult to map consistently because of the heterogeneous volcanic aquifer system and limited subsurface information. These conditions complicate the identification of zones with aquifer characteristics favorable for groundwater potential, highlighting the need for an approach that integrates multiple hydrogeological parameters spatially. This study aims to map groundwater potential using the Groundwater Confinement, Overlying Lithology Resistivity, Depth to Aquifer, and Thickness of Aquifer (GODT) model and to compare the performance of two weighting approaches: literature-based weighting (GODT-MCDA) and the Analytical Hierarchy Process (GODT-AHP). The analysis integrates 1-D geoelectrical inversion results from 37 measurement points with data from 58 wells to derive the GODT parameters and Groundwater Potential Index (GWPI), which were subsequently compared with Well Water Column Thickness (WWCT). The results show that GODT-MCDA provides a stronger agreement with field groundwater conditions (R = 0.73) than

GODT-AHP (R = 0.62), indicating that literature-based weighting more consistently represents the hydrogeological characteristics of the study area. Therefore, GODT-MCDA is more suitable for preliminary groundwater potential mapping in the volcanic environment of Ternate Island, while GODT-AHP can serve as an alternative approach for evaluating the influence of parameter priorities on the mapping results. The findings provide preliminary information to support the identification of priority zones for groundwater exploration and management without interpreting GWPI as a direct measure of aquifer productivity.

Keywords**:** *Geoelectricity 1-D, GODT, Groundwater potential, Multicriteria, AHP*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang berkepanjangan dan meningkatnya kebutuhan air telah menyebabkan penurunan ketersediaan air permukaan yang layak dikonsumsi di berbagai wilayah (Vörösmarty *et al*., 2000). Berdasarkan hasil pengamatan satelit *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), pemanasan global diduga berkontribusi terhadap penurunan cadangan air tawar secara berkelanjutan akibat perubahan pola penyimpanan air di daratan (NASA/Goddard Space Flight Center, 2024). Perubahan iklim juga berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas sumber daya air karena siklus hidrologi berkaitan erat dengan perubahan kondisi atmosfer, termasuk peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (DeNicola *et al*., 2015). Kondisi tersebut mendorong peningkatan pemanfaatan air tanah sebagai sumber air alternatif. Secara global, lebih dari dua miliar penduduk memanfaatkan air tanah untuk memenuhi kebutuhan domestik maupun kegiatan produktif (Alley *et al*., 1999; Famiglietti, 2014). Di Indonesia, pengambilan air tanah dalam jumlah yang cukup berarti telah dilakukan sejak tahun 1879 dan kemudian berkembang seiring dengan meningkatnya kebutuhan air masyarakat (Rejekiningrum, 2009).

Keberadaan dan produktivitas akuifer tersebar secara tidak merata karena sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, struktur batuan, serta karakteristik hidrogeologi setiap wilayah (Foster & Loucks, 2006; Margat & Van Der Gun, 2013). Wilayah yang tersusun oleh batuan dengan permeabilitas rendah umumnya memiliki akuifer yang kurang produktif (Alley *et al*., 1999) sebagaimana dilaporkan pada berbagai kondisi geologi di Asia Selatan (Shah, 2007) dan Afrika (MacDonald *et al*., 2012). Perbedaan kondisi tersebut mengakibatkan potensi air tanah bervariasi antarwilayah (Pratama *et al*., 2024; Sudarmaji, 2006). Permasalahan eksplorasi air tanah tersebut menjadi penting di Pulau Ternate karena kondisi hidrogeologinya dikontrol oleh produk vulkanik Gunung Gamalama yang memiliki karakteristik litologi dan tingkat rekahan yang bervariasi sehingga menyebabkan kedudukan dan produktivitas akuifer dapat berubah secara lateral maupun vertikal dalam jarak yang relatif pendek.

Penelitian tentang zona yang berpotensi memiliki akuifer produktif telah dilakukan dengan berbagai pendekatan, antara lain penginderaan jauh, Sistem Informasi Geografis (GIS), dan metode geofisika. Penginderaan jauh dan GIS banyak digunakan karena mampu mengintegrasikan parameter spasial dan menyediakan estimasi awal potensi sumber daya air tanah secara efisien (Arulbalaji *et al*., 2019; Faust *et al*., 1991; Hinton, 1996; Jha *et al*., 2010). Selain menggunakan data penginderaan jauh, pendekatan GIS juga dapat dikembangkan melalui interpolasi parameter hidrogeologi maupun integrasi data sumur bor. (Nurfaika & Kasim, 2021; Subramani *et al*., 2024). Interpretasi berbasis data permukaan masih memerlukan dukungan informasi geologi dan hidrogeologi bawah permukaan agar hasil pemetaan dapat menggambarkan kondisi akuifer secara lebih representatif (Hoffmann & Sander, 2007). Metode geolistrik 1-D merupakan metode yang membantu memperoleh data bawah permukaan dalam eksplorasi air tanah (Reynolds, 2011; Irjan, 2012; Prabowo *et al*., 2022; Puspita & Aprilia, 2022) dengan mengkarakterisasi akuifer pada kondisi geologi yang berbeda, termasuk pada lingkungan vulkanik yang kompleks (Soupios *et al*., 2007; Kirsch, 2009).

Namun penelitian terkait integrasi metode GIS dengan data geofisika di wilayah pulau vulkanik kecil, seperti Pulau Ternate masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengintegrasikan GIS dan data geofisika menggunakan metode *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) berbasis skoring penelitian sebelumnya dan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dalam pemetaan potensi air tanah di Pulau Ternate. Data lapisan tanah hasil interpretasi geolistrik 1-D akan diekstrak menjadi parameter baru yakni GODT, dengan G merupakan konfigurasi akuifer, O merupakan nilai resistivitas penutup akuifer, D merupakan kedalaman akuifer, dan T merupakan ketebalan akuifer. Kemudian dari parameter tersebut akan dihitung bobotnya menggunakan metode MCDA dan AHP. Data observasi tambahan merupakan data ketebalan air sumur yang digunakan untuk menganalisis keefektivitasan metode MCDA dan AHP dalam memetakan potensi air tanah melalui data geolistrik 1-D.

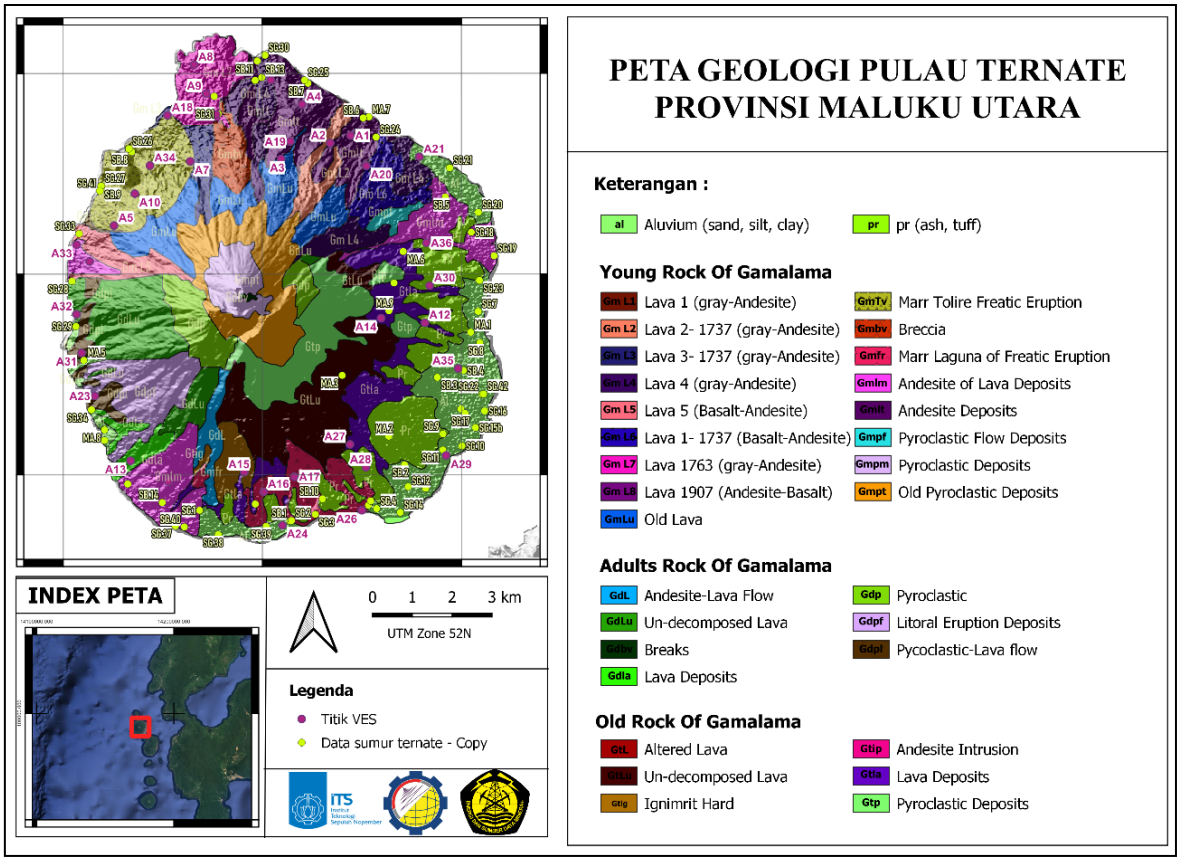
Pulau Ternate merupakan bagian dari wilayah kepulauan Provinsi Maluku Utara yang terletak di atas jalur penunjaman pada busur Pulau Halmahera sebagai zona pertemuan antara Lempeng Pasifik, Eurasia, dan Australia. Wilayah Maluku Utara dibagi menjadi dua bagian yaitu pulau vulkanik dan pulau non-vulkanik. Pulau vulkanik menempati wilayah bagian Barat yaitu Pulau Ternate, Pulau Tidore, Pulau Moti, Pulau Mare, Pulau Makian, dan Pulau Sangihe (Hall & Spakman, 2002). Secara fisiografis Pulau Ternate terletak pada Fisiografi Halmahera pada bagian Mandala Busur Kepulauan Gunungapi yang memiliki morfologi vulkanik berjejer membentuk busur vulkanik gunung api. Busur vulkanik gunung api ini membentuk kerucut-kerucut gunung api yang masih aktif berumur Kuarter (Darlan *et al*., 1997).

Secara geologi, Pulau Ternate tersusun oleh empat satuan utama, yaitu Endapan Permukaan, Gunungapi Gamalama Muda (Gm), Gunungapi Gamalama Dewasa (Gd), dan Gunungapi Gamalama Tua (Gt) (Bronto *et al*., 1982) dimana sebaran satuan batuan tersebut disajikan pada Gambar 1. Satuan Gunungapi Gamalama Muda tersebar pada bagian utara pulau, satuan Gunungapi Gamalama Dewasa mendominasi bagian selatan, sedangkan satuan Gunungapi Gamalama Tua berkembang pada bagian barat Pulau Ternate. Endapan permukaan berupa material aluvial dijumpai di sepanjang kawasan pesisir timur laut hingga barat daya.

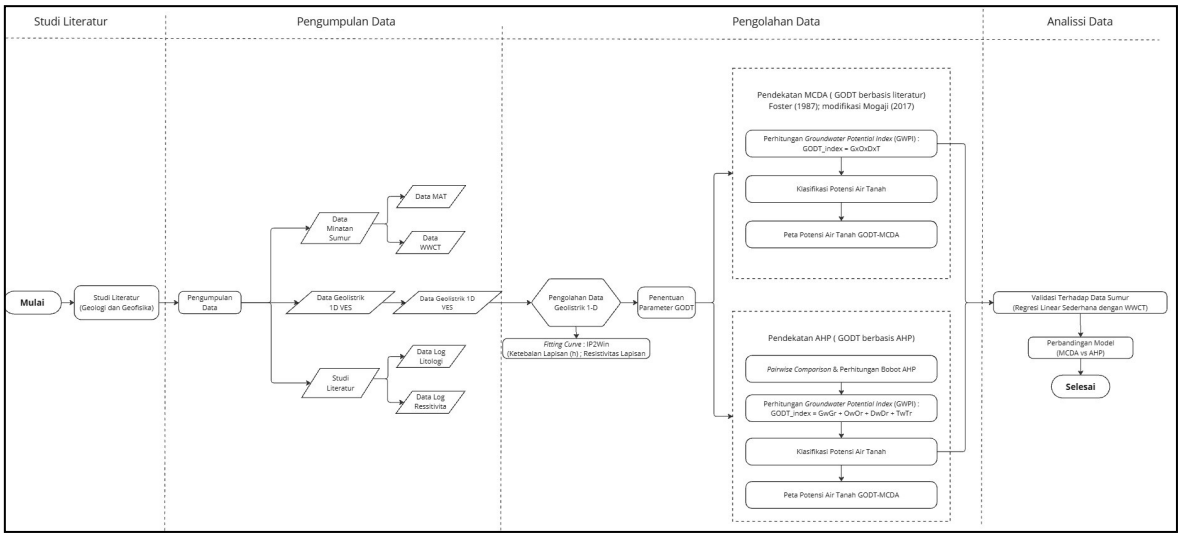
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data geolistrik 1-D berjumlah 37 titik menggunakan konfigurasi Schlumberger dengan Panjang lintasan 200 – 700 meter yang tersebar di kaki gunung Gamalama dan diambil pada tahun 2024. Pengolahan dilakukan dengan *software* IP2Win untuk memperoleh parameter GODT. Penelitian ini menggunakan data kekebalan air tanah yang diperoleh dari kedalaman sumur dikuran kedalaman MAT (Mata Air Tanah). Selain itu penelitian ini menggunakan singkapan geologi dan hasil penelitian – penelitian sebelumnya sebagai alat bantu validasi posisi akuifer akibat tidak ada data sumur di lokasi penelitian. Parameter yang diperoleh dari ekstraksi pengolahan data geolistrik 1-D adalah konfigurasi akuifer (G), resistivitas tanah penutup akuifer (O), kedalaman akuifer (D), dan ketebalan akuifer (T). Setiap parameter diklasifikasikan kedalam beberapa kelas berdasarkan kajian hidrogeologi dan kondisi geologi (Daud *et al*., 2022; Faral *et al*., 2022), parameterisasi pendekatan berbasis literatur dapat dilihat pada Tabel 1, kemudian disesuaikan dengan distribusi nilai hasil interpretasi VES. Pemetaan dilakukan menggunakan pendekatan pembobotan dengan dua skema, yakni bobot yang diadopsi dari (Foster, 1987) dan Mogaji & Omobude, (2017), serta bobot yang ditentukan menggunakan AHP. Alur kerja penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Perhitungan indeks potensi air tanah dengan pendekatan pembobotan berbasis literatur dapat dihitung dengan persamaan (Mogaji & Omobude, 2017) :



Gambar 1. Peta geologi gunungapi Gamalama (Bronto *et al*., 1982).



Gambar 2. Diagram alir penelitian

$$GWPI = G \times O \times D \times T \quad \text{..... (1)}$$

Berbeda dengan skema pembobotan berbasis literatur, pendekatan AHP menentukan bobot berdasarkan kepentingan relatif setiap parameter melalui perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*). Dalam konteks Pulau Ternate sebagai pulau vulkanik kecil, prioritas parameter ditetapkan berdasarkan relevansi hidrogeologis terhadap keberadaan dan ketersediaan air tanah,

dengan urutan G > T > D > O. Parameter G ditempatkan sebagai prioritas utama karena konfigurasi akuifer merepresentasikan kondisi geologi dan hidrogeologi yang mengontrol keberadaan serta kontinuitas akuifer (Purnama *et al*., 2023). Parameter T menempati prioritas kedua karena ketebalan akuifer berkaitan dengan volume zona jenuh dan kapasitas penyimpanan air tanah (Akintorinwa *et al*., 2020). Parameter D berada pada prioritas ketiga karena kedalaman akuifer berhubungan dengan aksesibilitas terhadap sumber air tanah, sedangkan O menjadi prioritas keempat karena resistivitas lapisan penutup lebih merepresentasikan karakteristik material penutup yang memengaruhi infiltrasi dan perlindungan akuifer. Penentuan prioritas tersebut mempertimbangkan karakteristik hidrogeologi Ternate yang dipengaruhi sistem vulkanik Gunung Gamalama dan kondisi akuifer pada pulau kecil (Daud *et al*., 2022; Hadi *et al*., 2019).

Bobot setiap parameter diperoleh melalui penyusunan matriks perbandingan berpasangan, normalisasi matriks, dan perhitungan *principal eigenvector* untuk memperoleh bobot prioritas. Konsistensi penilaian kemudian dievaluasi menggunakan *Consistency Ratio* (CR) mengikuti prosedur AHP (Feizizadeh & Blaschke, 2013; Malczewski, 1999; Saaty, 1980). Matriks perbandingan berpasangan, bobot prioritas, dan nilai konsistensi disajikan pada Tabel 2.

Hasil perhitungan Groundwater Potential Index (GWPI) diinterpolasi menggunakan metode kriging untuk menghasilkan distribusi spasial indeks potensi air tanah di Pulau Ternate. Kriging dipilih karena merupakan metode geostatistik yang mempertimbangkan hubungan spasial antar titik pengamatan dalam mengestimasi nilai pada lokasi yang tidak tersampel, sehingga memungkinkan representasi kontinuitas spasial GWPI secara lebih terstruktur (Bridges, 1985). Hasil interpolasi kemudian diklasifikasikan menggunakan metode *Natural Breaks (Jenks)* untuk mengidentifikasi kelompok nilai GWPI berdasarkan pola distribusi data dan menghasilkan zonasi potensi air tanah (Adama *et al*., 2024).

Bobot hasil AHP selanjutnya digunakan untuk menentukan peringkat setiap kelas pada parameter GODT sebagaimana disajikan pada Tabel 3, kemudian dihitung menggunakan persamaan Tabel 3.

Indeks potensi air tanah pada pendekatan pembobotan AHP dihitung menggunakan persamaan 2.

$$GWPI = G_W G_R + O_W O_R + D_W D_R + T_W T_R \quad .... (2)$$

Evaluasi model GODT dilakukan dengan mengorelasikan nilai GWPI dari masing-masing titik VES dengan WWCT pada sumur terdekat. Nilai

Tabel 1. Pembobotan parameter GODT (Foster, 1987; modified by Mogaji, 2017)

G	Note	O	Note	D	Note	T	Note
NN	0	<30	0,7	<5	0,9	<8,34	0,07
C	0,2	30 - 150	0,5	5 - 20	0,8	8,34 - 15,24	0,13
SC	0,5	150 - 500	0,6	20 - 50	0,7	15,24 - 20,99	0,2
U	0,6	>500	0,8	>50	0,6	20,99 - 30,18	0,27
						30,18 - 59,14	0,33

Tabel 2. *Pair-wise* parameter GODT dengan metode AHP

Kriteria	G	O	D	T	Wieght (bobot)	Rasio Konsistensi
G	1	4	2	1,333333	0,398406	0,008131
O	0,25	1	0,5	0,333333	0,103586	
D	0,5	2	1	0,666667	0,199203	
T	0,75	3	1,5	1	0,298805	
Total	2,5	10	5	3,333333	1	

Tabel 3. Pembobotan parameter GODT metode AHP

Parameter	Kriteria	Peringkat	Bobot
G	U	4	**0,398406375**
	SC	3	
	C	2	
	NN	1	
O	<30	4	**0,103585657**
	30 - 150	5	
	150 - 300	2	
	>300	3	
D	<5	5	**0,199203187**
	5 - 20	4	
	20 - 50	3	
	>50	1	
T	<8,34	1	**0,298804781**
	8,34 - 15,24	2	
	15,24 - 20,99	3	
	20,99 - 30,18	4	
	30,18 - 59,14	5	

GWPI dari skema pembobotan literatur dan AHP kemudian dibandingkan dengan WWCT menggunakan koefisien korelasi (*r*) untuk mengevaluasi kesesuaian model terhadap kondisi air tanah di lapangan (Mogaji & Omobude, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Data Geolistrik. Pulau Ternate memiliki sistem akuifer bebas dan tertekan yang berkembang pada lingkungan vulkanik Gunung Gamalama (Ansori *et al*., 2025; Daud *et al*., 2022). Akuifer tersebut berkaitan dengan endapan vulkanik yang terbentuk melalui aktivitas erupsi berulang, dengan karakteristik bawah permukaan yang bervariasi secara vertikal dan lateral (Arif *et al*., 2024). Pada penelitian ini, zona akuifer diinterpretasikan tersusun atas pasir vulkanik, tufa (tuf) kasar, tuf pasiran, lapili, breksi vulkanik serta lava lapuk (Firman *et al*., 2022; Hadi *et al*., 2019; Parnadi & Salam, 2022), dengan rentang resistivitas 30 – 300 Ωm, ketebalan 0.39 – 83.9 m, dan kedalaman 1.15 – 184 mbmt.

Data hasil inversi seluruh titik VES disajikan pada Tabel 4. Urutan nilai pada setiap kolom merepresentasikan lapisan bawah permukaan secara berurutan dari lapisan pertama hingga lapisan terakhir.

Aplikasi Teknik Pembobotan dalam Sistem Informasi Geografis (SIG). Distribusi kedalaman akuifer menunjukkan variasi spasial yang cukup jelas, dengan akuifer relatif dangkal berkembang pada barat daya dan akuifer lebih dalam ditemukan pada utara dan timur. Meskipun begitu, pola distribusi ketebalan akuifer lebih cenderung tinggi pada daerah utara dan lebih tipis pada area barat sebagaimana laporan Amiruddin & Umasugi (2023), Humas BAZNAS RI (2023). Variasi karakteristik tersebut menunjukkan bahwa sistem akuifer Pulau Ternate memiliki heterogenitas spasial yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi potensi air tanah (Daud *et al*., 2022; Hadi *et al*., 2019).

Konfigurasi akuifer (G) diklasifikasikan menjadi empat kategori, yaitu akuifer bebas (U), akuifer tertekan (C), akuifer semi-tertekan (SC), dan nonakuifer (NN) yang dapat dilihat pada Gambar 3a. Berdasarkan hasil analisis, konfigurasi akuifer tertekan mendominasi wilayah selatan Pulau Ternate. Analisis difokuskan pada akuifer terdangkal sebagai representasi lapisan air tanah yang relatif mudah diakses untuk pemanfaatan masyarakat. Karakteristik hidrostratigrafi Pulau Ternate dipengaruhi oleh aktivitas erupsi Gunung Gamalama yang berulang, yang menghasilkan stratifikasi endapan vulkanik dan membentuk sistem akuifer dengan karakteristik berbeda (Achmad, 2016).

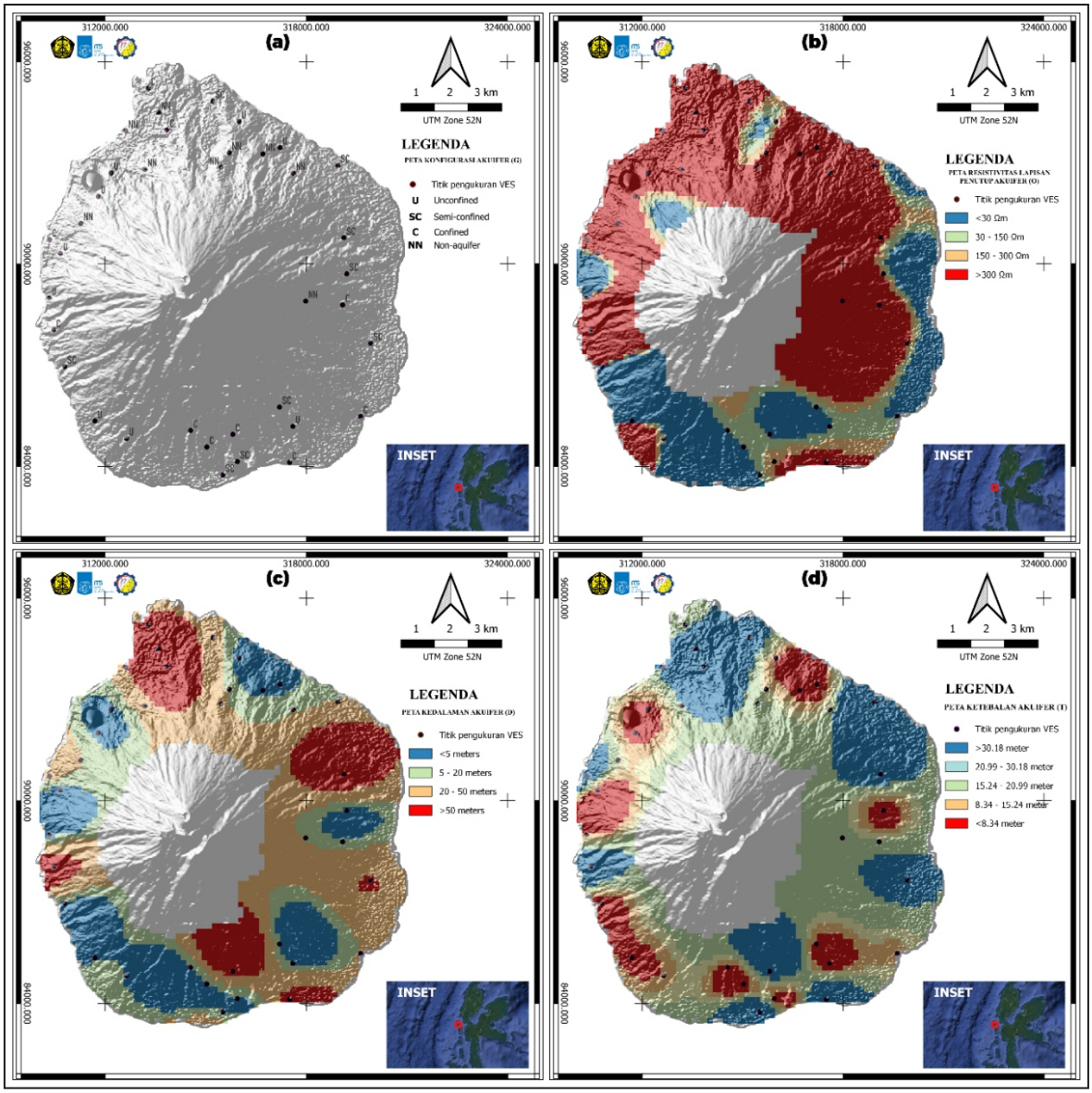
Rentang resistivitas batuan penutup yang dominan secara statistik merupakan rentang <30 Ωm , diinterpretasikan sebagai material aluvial, pasir, lempung tufaan, dan material vulkanik (Faral *et al*., 2022) yang dapat dilihat pada Gambar 3b. Secara spasial, material tersebut terkonsentrasi di wilayah selatan dan timur Pulau Ternate. Namun, hasil interpolasi kriging menunjukkan dominasi visual area dengan resistivitas >300 Ωm, yang mengindikasikan adanya variasi spasial resistivitas batuan penutup. Secara hidrogeologis, karakteristik litologi dan permeabilitas lapisan penutup dapat memengaruhi kemampuan lapisan dalam menghambat pergerakan kontaminan menuju akuifer (Ezebunanwa *et al*., 2026; Ibuot *et al*., 2025).

Tabel 4. Hasil pengolahan geolistrik 1-D

Titik	Error	Resistivitas (Ωm)*	Ketebalan (m)*	Kedalaman (m)*
A1	3,27	2757/236/633/576/622/5875/461/536/10,3	0,75/0,399/0,795/1,24/7/23,3/50,2/130	0,75/1,15/1,94/3,19/10,2/33,5/83,7/214
A2	2,38	7444/3148/8309/1936/1724/648/2298/1305/4187	0,9444/0,639/2,46/5,19/3,14/21,1/17,5/155	0,944/1,58/4,04/9,23/12,4/33,6/51,1/206
A3	2,83	645/728/5807/1350/2427/1105	0,924/4,88/7,99/22,5/157	0,924/5,8/13,8/36,3/193
A4	4,04	158/236/297/1430/3008/2001/166/117/91,8	0,741/1,42/7,42/2,04/32,3/17,6/66/73,7	0,741/2,16/9,58/11,6/43,9/61,5/128/201
A5	4,36	334/454/1973/8304/3301/867/1146/1903	0,891/0,819/1,21/4,92/12,2/51,4/65,5	0,891/1,71/2,92/7,84/20/71,5/137
A6	1,79	352/206/133/6407/4071/161/348/19621	0,777/1,28/2,11/3,4/6,63/42/141	0,777/2,06/4,17/7,58,/14,2/56,2/197
A7	1,88	3488/1537/700/2997/5337/950/802/643	1,28/2,61/5,77/2,73/16,9/51,8/24,1	1,28/3,89/9,67/12,4/29,3/81,1/105
A8	4,09	1752/5072/500/127/13,7/3,14	1,75/19,2/37,9/27,5/39,5	1,75/20,9/58,8/86,3/126
A9	1,9	1131/6363/19894/5897/608/235	0,835/3,74/15/22,9/91,6	0,835/4,57/19,6/22,9/134
A11	2,83	464/257/449/350/500/2882/735/392	0,75/2,62/1,55/9,68/6,13/50,2/59,3	0,753/3,37/4,93/14,6/20,7/70,9/130
A12	2,83	254/96,5/2898/1580/269/145/781/345/92,9	0,75/1,37/5,12/2,22/21,6/23,3/106/55,5	0,75/2,12/7,23/9,45/31/54,4/161/21,6
A13	3,63	23,1/289/4516/720/813/1257	1,91/3,16/13,8/33,8/72,1	1,91/5,07/18,9/52,7/125
A14	2,37	261/1641/931/5335/979/503/699/1154	1,84/1,37/3,64/7,15/50,6/130	1,84/3,21/6,85/14/21,3/72/202
A15	4,9	11,1/9,97/155/13282/19847	1,06/0,141/5,78/151	1,66/1,8/7,58/158
A16	4,83	26,5/19,1/128/560/143/879/2462/1592	0,963/1,76/1,37/6,35/27,4/28,2/76,8	0,963/2,72/4,09/10,4/37,8/66,1/143
A17	3,31	27,6/7,95/29,5/6,58/2,66/6,89/22/89,2/161	0,75/1,98/3,94/22,6/20,4/17,4/69/47,6	0,75/2,73/6,67/29,2/49,6/67/136/184
A18	3,8	972/6774/13913/353/119/63,3	0,75/12,3/29,4/17,8/93,4	0,75/13/41,8/60,2/154
A19	2,51	222/538/1493/2761/1129/672	0,75/2,21/45,3/55,4/96,5	00,75/2,96/48,2/104/200
A20	3,04	106/1322/642/3162/1710/809/746/154	0,801/2,65/8,01/11,1/12,4/104/66,6	0,801/3,45/11,5/22,6/35/139/206
A21	3,32	784/478/1236/403/187/61,4/11,4	0,75/3,16/3,36/6,01/8,91/83,9	0,75/3,91/7,27/13,3/22,2/106
A22	5,72	29,8/198/759/4887/8477/11012	3,36/10,2/8,59/30,1/146	3,36/13,5/22,1/52,2/198
A23	4	96,7/70,8/22,6/36,5/29,5/74,9/380/78,9/7,21/2,19	0,807/0,123/2,48/1,75/9,69/3,27/12,3/16,7/26	0,807/0,929/3,41/5,17/14/17,3/29,6/46,3/72,3
A24	1,47	74,85/11,75/10,98/12,39/21,89/30,9/36,36/40,88	1,059/0,8563/1,371/2,881/1,164/14/49,54	1,059/1,915/3,286/6,168/7,332/21,33/70,87
A25	4,66	71,3/433/67,3/40,1/19,2/4,19/337/776	0,75/0,985/1,08/10,1/17,5/58,2/107	0,75/1,73/2,82/12,9/30,4/88,6/196
A26	3,28	204/347/176/1564/303/179/97,2	1,77/1,53/2,85/10,2/49,1/57,9	1,77/3,3/6,15/16,4/65,4/123
A27	3,33	12,7/59,3/162/445/882/648/1220	1,98/0,967/5,68/5,27/24,2/50,1	1,98/2,98/8,63/13,9/38,1/88,3
A28	4,23	28,8/16,4/85,7/1229/929/672/83	1,5/0,83/1,01/8,95/2,82/51,1	1,5/2,33/3,34/12,3/40,5/91,6
A29	3,86	32,1/4,65/6,53/20,3/26,8/61,1/18,4/6,62/3,84	1,78/1,96/3,04/4,48/10,7/13/35,3/20,6	1,78/3,73/6,77/11,2/22/34,9/70,3/90,9
A30	2,34	48,8/370/64/164/118/236/210/754	0,779/1,34/2,92/2,68/10,8/41,9/96,2	0,779/2,12/5,05/7,73/18,6/60,5/157
A31	4,4	78,6/57,2/23,5/1068/1982/709/203/25/16,9	1,81/1,67/4,2/6,38/19,2/34,7/47,4/114	1,81/3,48/7,68/14,1/33,2/68/115/229
A32	2,81	173/44,5/99,9/76,6/183/152/32,2/1,67	0,75/0,55/3,39/3,22/14,7/27,8/63,7	0,75/1,3/4,69/7,91/22,61/50,41/114,11
A33	4,65	531/1486/2889/478/86,7/14,8/9	1,11/0,758/2,43/21,5/46,1/59,9	1,11/1,87/4,3/25,8/71,9/132
A34	2,83	951/198/272/653/3759/393/249	0,507/2,25/1,38/7,11/20,5/120	0,507/2,76/4,14/11,2/31,7/152
A35	1,97	177/86/883/474/75/324/155/29	1,74/1,34/1,47/3,04/9,1/35,3/53,3	1,74/3,08/4,55/7,59/16,7/50,7/104
A36	2,71	747/651/438/78/142/391/272/53,6	0,919/4,63/1,49/3,92/11,1/61,8/39,2	0,919/5,55/7,04/11/22,1/83,8/123
A37	3,85	682/209/80,2/1544/820/178/26,8/15,9	2,84/0,574/2,92/12,8/11/45,5/115	2,84/3,42/6,34/19,1/30,1/75,7/191
A38	4,13	993/1590/5511/692/332/97,8/69,7	1,63/1,89/11,8/52,4/20,5/71,9	1,63/3,53/15,3/67,7/88,2/160

Secara statistik, kedalaman akuifer didominasi oleh kategori <5 m bmt, sedangkan distribusi spasial menunjukkan dominasi pada kedalaman 20 – 50 m bmt yang dapat dilihat pada Gambar 3c. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa frekuensi kemunculan kelas tidak selalu merepresentasikan dominasi spasialnya. Sementara itu, ketebalan akuifer secara statistik didominasi kategori <8.34 m, tetapi secara spasial kelas 15.24 – 29.99 m menunjukkan sebaran yang lebih luas sesuai dengan Gambar 3d. Ketebalan akuifer yang lebih besar menunjukkan interval zona jenuh yang lebih tebal dan secara teoritis dapat memberikan kapasitas penyimpanan air tanah yang lebih besar, meskipun kuantifikasi storage tetap bergantung pada parameter hidrolik seperti *specific yield* atau *specific storage* (Chen *et al*., 2018; Kuang *et al*., 2020). Kondisi ini sejalan dengan karakteristik hidrogeologi Pulau Ternate yang menunjukkan variasi ketebalan akuifer mengikuti morfologi dan konfigurasi endapan vulkanik (Daud *et al*., 2022).

Indeks Prediksi Potensi Air Tanah. Integrasi parameter GODT menggunakan dua skema pembobotan menghasilkan variasi nilai *Groundwater Potential Index* (GWPI) dan pola spasial yang berbeda seperti pada Tabel 5. Pada skema pembobotan berbasis literatur, nilai GWPI berkisar antara 0 – 0.0924, dengan kategori tinggi sebagai kelas dominan yang mencakup 29.7% titik pengamatan seperti yang terlihat pada Tabel 6. Sebaran kategori tinggi terutama dijumpai di wilayah pesisir utara yang memanjang ke



Gambar 3. Peta distribusi kriteria GODT. a). Konfigurasi akuifer; b). Resistivitas tanah penutup; c). Kedalaman akuifer; d). Ketebalan akuifer.

arah timur serta pada beberapa titik di bagian selatan Pulau Ternate sesuai dengan Gambar 4 dan 5. Sementara itu, penerapan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menghasilkan nilai GWPI sebesar 2.0 – 3.9, dengan kategori tinggi mendominasi 32.4% titik pengamatan. Perbedaan pola tersebut berkaitan dengan variasi bobot relatif antarparameter, khususnya parameter G dan T yang memperoleh bobot lebih besar pada skema AHP sehingga kontribusinya terhadap nilai indeks menjadi lebih dominan. Dengan demikian, kedua skema pembobotan memberikan tingkat penekanan yang berbeda terhadap parameter hidrogeologi dalam menentukan potensi air tanah.

Pola spasial Indeks Potensi Air Tanah (GWPI) di Pulau Ternate menunjukkan keterkaitan linier dengan karakteristik hidrogeologi pulau vulkanik kecil (*small volcanic island*) yang dikontrol secara radial oleh sistem Gunungapi Gamalama(Achmad, 2016; Hadi *et al*., 2019). Zona GWPI tinggi yang melampar di sepanjang pesisir utara, timur, hingga sebagian selatan mencerminkan hasil integrasi kondisi akuifer

Tabel 5. Indeks prediksi potensi air tanah GODT

Titik	X	Y	G	O	D	T	GODT FOSTER	GODT AHP
A1	317217	93451	U	2757	0,75	0,399	0,0504	3,199203
A2	316708	93263	NN	0	0	0	0	2,10757
A3	315471	92870	NN	0	0	0	0	2,10757
A4	315998	94227	U	158	0,741	8,84	0,0702	3,498008
A5	311277	91210	NN	0	0	0	0	2,10757
A6	310666	90316	U	352	0,777	3,39	0,0504	3,199203
A7	313191	92810	NN	0	0	0	0	2,10757
A8	313288	95217	C	2441,333	58,8	27,5	0,02592	2,398406
A9	313594	94494	NN	0	0	0	0	2,10757
A11	311800	92005	U	464	0,75	2,62	0,0504	3,199203
A12	319082	88785	C	1207,125	9,45	21,6	0,03456	2,996016
A13	311692	85348	U	23,1	1,91	3,16	0,0441	3,302789
A14	317981	88900	NN	0	0	0	0	2,10757
A15	314546	85063	C	10,535	1,8	5,78	0,00882	2,505976
A16	315030	84574	C	22,8	2,72	1,37	0,00882	2,505976
A17	315805	84950	C	13,53	67	47,6	0,02772	2,904382
A18	312620	93956	NN	5503	60,2	93,4	0	2,298805
A19	315707	93305	NN	0	0	0	0	2,10757
A20	317612	92694	NN	0	0	0	0	2,10757
A21	318944	92923	SC	617,6	22,2	83,9	0,0924	3,59761
A22	312637	84830	U	29,8	3,36	10,2	0,0819	3,601594
A23	310794	86964	SC	63,36667	3,41	1,75	0,01575	3,007968
A24	315503	83741	SC	26,372	7,332	63,54	0,0924	3,900398
A25	315943	84141	SC	252,15	1,73	11,18	0,0351	3,099602
A26	317498	84115	C	518,8	65,4	57,9	0,03168	2,800797
A27	317200	85757	SC	36	2,98	5,68	0,01575	3,007968
A28	317599	85185	U	22,6	2,33	1,01	0,0441	3,302789
A29	319613	85479	C	18,076	22	13	0,01274	2,406375
A30	319202	89710	SC	209,4	2,12	2,92	0,0189	2,800797
A31	310464	88037	C	3918,3	68	47,4	0,03168	2,697211
A32	310336	89001	U	173	0,75	7,16	0,0378	2,003984
A33	310341	90734	C	1346	25,8	46,1	0,03696	3,095618
A34	312180	92705	U	951	0,507	3,63	0,0504	3,095618
A35	319916	87647	SC	336,5	50,7	35,3	0,0792	3,199203
A36	319121	90778	SC	407,8333	83,8	39,2	0,0792	3,199203
A37	315217	94833	SC	667,04	30,1	45,5	0,0924	3,59761
A38	313842	93979	C	1823,6	88,2	71,9	0,03168	2,697211

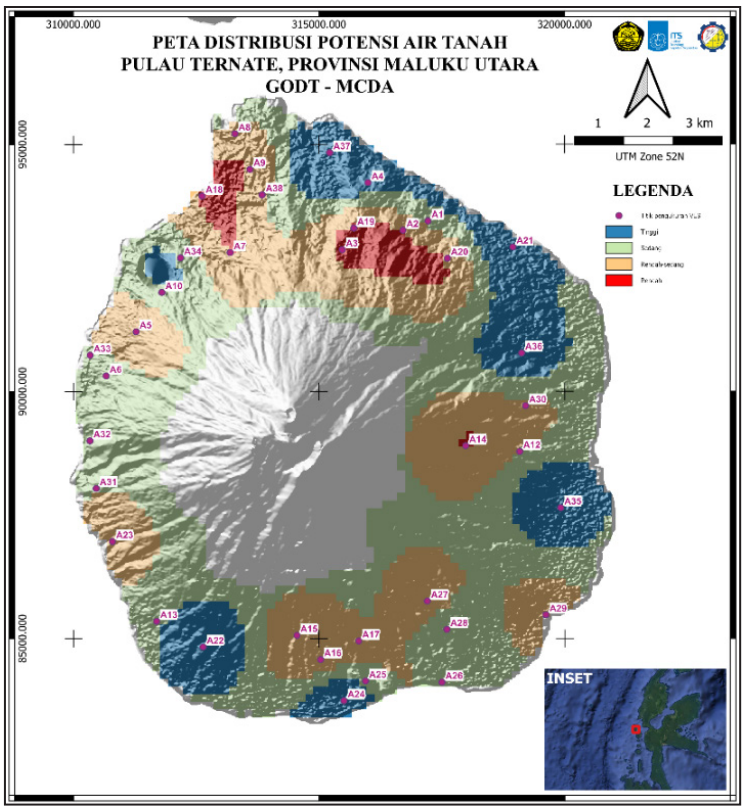
Tabel 6. Karakteristik prediksi potensi air tanah

Indeks Potensi Air Tanah	GODT-MCDA		GODT-AHP	
	Range	Frekuensi	Range	Frekuensi
Tinggi	>0.05	29.72	>3.1	32.43
Sedang-tinggi	0.03 - 0.05	24.32	2.8 - 3.1	24.32
Sedang-rendah	0.008 - 0.03	21.62	2.4 - 2.8	13.51
Rendah	<0.008	24.32	<2.4	29.72

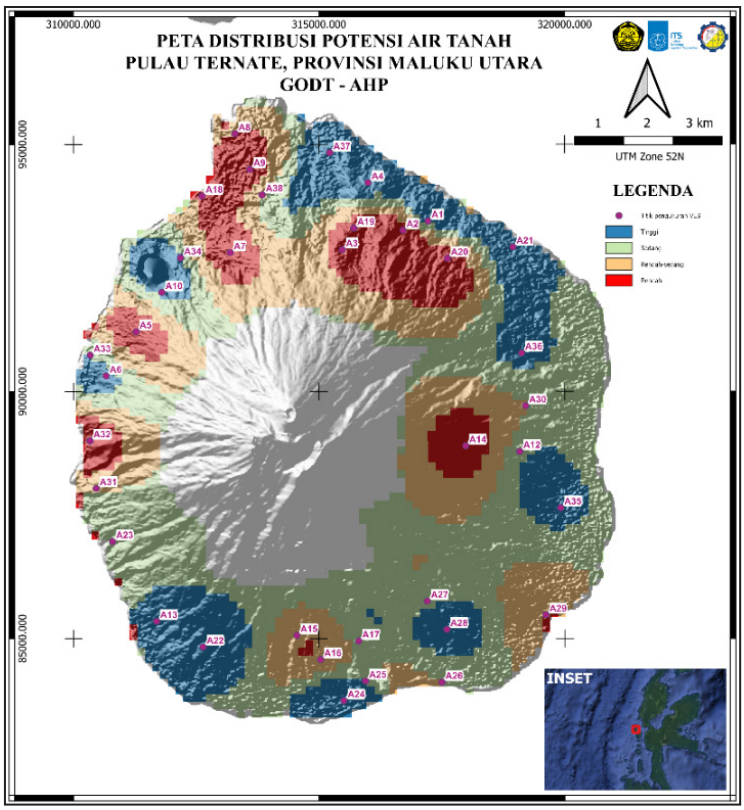
yang relatif mendukung, khususnya konfigurasi dan ketebalan akuifer, pada bagian distal sistem vulkanik.

Peningkatan nilai GWPI di wilayah pesisir (fasies distal) ini tidak merepresentasikan zona resapan (recharge zone), melainkan zona luaran (discharge zone) tempat akumulasi lensa air tawar berada (Hadi *et al*., 2019; Singhal & Gupta, 2010). Kondisi tersebut dikontrol oleh pengendapan material piroklastik rombakan dan aluvial pasiran yang memiliki porositas serta permeabilitas antar-butir yang tinggi di bagian kaki lereng gunung api (Hadi *et al*., 2019; Parnadi & Salam, 2022).

Validasi akurasi metode GODT dilakukan melalui analisis koefisien korelasi (R) yang menghubungkan spasial GWPI dengan ketebalan kolom air sumur WWCT dari titik geolistrik 1-D dan sumur uji terdekat seperti pada Tabel 7. Data WWCT yang diperoleh dari sumur gali dan sumur bor berfungsi sebagai proksi empiris ketebalan jenuh akuifer atas untuk memvalidasi akurasi model zona potensi air tanah (Todd & Mays, 2004). Kendati demikian, pemanfaatan WWCT sebagai instrumen kontrol tetap valid



Gambar 4. Peta sebaran potensi air tanah berbasis GODT-MCDA



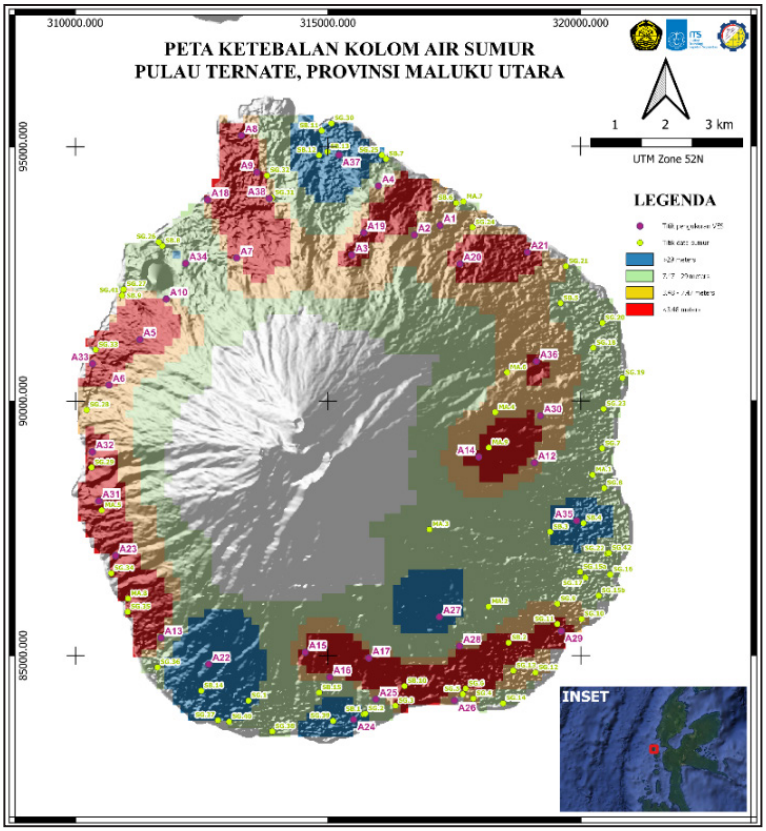
Gambar 5. Peta sebaran potensi air tanah berbasis GODT-AHP

Tabel 7. Korelasi GODT Index dengan titik sumur

Titik VES	Titik Sumur	Jarak	WWCT	GODT-MCDA	GODT-AHP
A1	SB,6	550	5,4	Disagree	Disagree
A2	SB,6	1088	5,4	Disagree	Disagree
A3	SG, 31	1959	0,68	Agree	Agree
A4	SB,6	1501	5,4	Disagree	Disagree
A5	SG,33	922	0,5	Agree	Agree
A6	SG,28	650	3,57	Disagree	Disagree
A7	SG,31	1379	0,68	Agree	Agree
A8	SG,32	936	0,1	Agree	Agree
A9	SG,32	209	0,1	Agree	Agree
A10	SB,9	863	2,62	Disagree	Disagree
A12	SG,7	1368	3,9	Agree	Agree
A13	SG,36	585	1	Disagree	Disagree
A14	SG,8	2562	0,98	Agree	Agree
A15	SB,15	839	1,1	Agree	Agree
A16	SB,15	367	1,1	Agree	Agree
A17	SB,10	894	1,3	Agree	Disagree
A18	SG,32	1248	0,1	Agree	Agree
A19	SB,7	1515	3,9	Disagree	Disagree
A20	SG, 24	760	1,15	Agree	Agree
A21	SB,5	1244	46,79	Agree	Agree
A22	SB,14	548	80,62	Agree	Agree
A23	SG,34	354	0,05	Agree	Disagree
A24	SB,1	229	56,87	Agree	Agree
A25	SG,3	414	1,55	Disagree	Disagree
A26	SG,5	206	5,97	Agree	Agree
A27	SB,2	1460	46,57	Disagree	Disagree
A28	SG,5	953	5,97	Agree	Disagree
A29	SG,11	158	1,04	Agree	Agree
A30	SG,23	1263	3,47	Disagree	Disagree
A31	SG,28	1822	3,57	Agree	Disagree
A32	SG,28	831	3,57	Agree	Disagree
A33	SG,28	934	3,57	Agree	Agree
A34	SB,8	579	31,05	Agree	Disagree
A35	SB,4	146	37,42	Agree	Agree
A36	SB,5	1277	46,79	Agree	Agree
A37	SB,13	200	77,84	Agree	Agree
A38	SG,31	46	0,65	Disagree	Agree

dan krusial secara hidrogeologis, karena nilai ketebalan kolom air tersebut merepresentasikan parameter ketebalan jenuh *(saturated thickness*) serta tingkat tekanan piezometrik lokal secara riil pada sistem akuifer (Akinlalu *et al*., 2017) . Dengan demikian, ketebalan kolom air pada sumur gali dapat merepresentasikan kondisi keterdapatan air tanah secara empiris pada lokasi pengamatan dan digunakan sebagai proksi lapangan (field proxy) untuk mengevaluasi konsistensi spasial peta potensi air tanah (Mogaji & Omobude, 2017) serta sejalan dengan penggunaan data sumur sebagai data lapangan untuk memvalidasi peta potensi air tanah, meskipun WWCT tidak dapat diperlakukan sebagai ukuran langsung produktivitas atau debit akuifer.

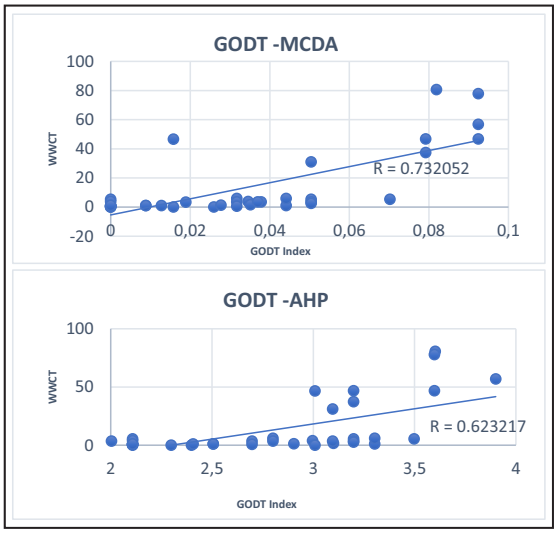
Secara spasial, visualisasi interpolasi WWCT menunjukkan konsistensi pola dengan peta GWPI seperti yang ditunjukan Gambar 6, di mana ketebalan kolom air terpusat di kawasan pesisir utara dan beberapa titik selatan, sedangkan penipisan kolom air di wilayah barat berasosiasi kuat dengan kontrol geomorfologi berupa morfologi tebing terjal. Kontras ketebalan kolom air ini juga dipengaruhi secara hidrolik oleh heterogenitas fasies pengendapan produk Gunungapi



Gambar 6. Peta sebaran ketebalan kolom air sumur (WWCT).

Gamalama, di mana material piroklastik jatuhan berbutir kasar mendominasi pesisir utara-timur dan batuan lava andesit masif mengontrol geomorfologi tebing barat (Alam *et al*., 2024).

Hasil validasi menunjukkan bahwa GWPI berbasis pembobotan literatur memiliki korelasi tinggi dengan WWCT (r = 0.73), sedangkan skema AHP menunjukkan korelasi moderat (r = 0.62) berdasarkan klasifikasi (Asuero *et al*., 2006) sesuai dengan Gambar 7. Temuan ini menunjukkan bahwa variasi GWPI pada skema pembobotan literatur lebih konsisten dengan kondisi air tanah yang direpresentasikan oleh WWCT dibandingkan skema AHP. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa pemilihan skema pembobotan tidak hanya memengaruhi distribusi spasial GWPI, tetapi juga tingkat kesesuaiannya terhadap kondisi lapangan, sekaligus mendukung penggunaan pendekatan GODT berbasis WWCT sebagai metode evaluasi model potensi air tanah. Pendekatan serupa telah diterapkan oleh (Mogaji & Omobude, 2017) yang



Gambar 7. Uji akurasi metode GODT, a). Regresi sederhana pendekatan MCDA; b. Regresi sederhana pendekatan AHP.

menggunakan hubungan GWPI–WWCT untuk mengevaluasi kinerja model GODT dan AHP. Namun, korelasi hanya menunjukkan derajat asosiasi dan tidak membuktikan hubungan kausal maupun secara langsung mengukur

produktivitas akuifer; karena itu, nilai *r* dalam penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai indikator kesesuaian empiris, bukan ukuran absolut akurasi peta potensi air tanah.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa integrasi data geolistrik 1-D dengan model GODT mampu mengidentifikasi karakteristik dan potensi air tanah di Pulau Ternate melalui parameter konfigurasi akuifer, resistivitas litologi penutup, kedalaman, dan ketebalan akuifer. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa akuifer yang teridentifikasi memiliki resistivitas 30 – 300 Ωm, ketebalan 0.39 – 83.9 m, dan kedalaman 1.15 – 184 m bmt, dengan konfigurasi akuifer berupa *unconfined*, *confined*, *semi-confined*, dan *non-aquifer*. Secara spasial, nilai GWPI tinggi terutama tersebar di pesisir utara hingga ke timur dan sebagian selatan Pulau Ternate, yang menunjukkan zona dengan kombinasi parameter GODT yang lebih mendukung potensi air tanah pada sistem hidrogeologi vulkanik. Perbandingan hasil validasi terhadap WWCT menunjukkan bahwa GODT-MCDA memiliki korelasi lebih tinggi (r = 0.73) dibandingkan GODT-AHP (r = 0.62), sehingga pembobotan berbasis literatur pada GODT-MCDA lebih konsisten dalam merepresentasikan kondisi air tanah lapangan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa GODT-MCDA lebih sesuai sebagai pendekatan awal pemetaan potensi air tanah pada lingkungan vulkanik Pulau Ternate, sedangkan GODT-AHP dapat digunakan sebagai pendekatan alternatif untuk mengeksplorasi pengaruh prioritas parameter terhadap hasil pemetaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada para pembimbing akademik di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, atas bimbingan, arahan, dan masukan selama proses penelitian dan penyusunan naskah. Terima kasih juga disampaikan kepada para pembimbing lapangan di Laboratorium Geofisika, Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, atas dukungan, akses data, fasilitas penelitian, serta masukan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, hingga penelitian dan penyusunan naskah ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Achmad, R. (2016). *Kajian Hidrogeologi Pulau Ternate* [Ph.D. Dissertation, Universitas Gadjah Mada]. https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/92978

Adama, A., Juscar, N., Mama, N., Tsoptie, T., Rachida, B., & Elvis, K. (2024). Delineation of groundwater potential zones using multi-criteria analysis (AHP), frequency ratios (RF), remote sensing and GIS: A case study of the Batcham municipality (west Cameroon). *Discover Water*, *4*(1), 75. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00108-7

Akinlalu, A. A., Adegbuyiro, A., Adiat, K. A. N., Akeredolu, B. E., & Lateef, W. Y. (2017). Application of multi-criteria decision analysis in prediction of groundwater resources potential: A case of Oke-Ana, Ilesa Area Southwestern, Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, *6*(1), 184–200. https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.03.001

Akintorinwa, O. J., Atitebi, M. O., & Akinlalu, A. A. (2020). Hydrogeophysical and aquifer vulnerability zonation of a typical basement complex terrain: A case study of Ododе Idanre southwestern Nigeria. *Heliyon*, *6*(8), e04549. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04549

Alam, Y. I., Samad, S., & Rauf, I. (2024). Analisis Potensi Kawasan Resapan Air Berbasis Spasial Di Kota Ternate. *CLAPEYRON: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *5*(1). https://doi.org/10.33387/clapeyron.v5i1.8933

Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). *Sustainability of ground-water resources*. U.S. Dept. of the Interior, U.S.

Geological Survey ; U.S. G.P.O. ; U.S. Geological Survey, Branch of Information Services [distributor].

Amiruddin, A., & Umasugi, B. (2023). Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Cekaman Kekeringan pada Tanaman Perkebunan di Pulau Ternate. *Pedontropika : Jurnal Ilmu Tanah Dan Sumber Daya Lahan*, *9*(1), 22–27. https://doi.org/10.26418/pedontropika.v9i1.73649

Ansori, C., Iriyanto, N., Hastria, D., Taniardi, P. N., Arif, A. K. D., & Al Fariji, M. (2025). Spatial geoarchaeology of megalithic cultural site (Jere) at Ternate Aspiring National Geopark, North Maluku, Indonesia. *International Journal of Geoheritage and Parks*, *13*(4), 671–690. https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2025.12.002

Arif, A. K. D., Agastya, I. B. O., Permadi, R., Marsaoly, R., & Waliyanti, I. K. (2024). Utilization of Geodiversity of Mount Gamalama Eruption Products as Geotourism Activities on The Batu Angus Geotrail, Aspiring Ternate Geopark. *JURNAL BIOSAINSTEK*, *6*(2), 69–83. https://doi.org/10.52046/biosainstek.v6i2.2395

Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: A case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, *9*(1), 2082. https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x

Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, *36*(1), 41–59. https://doi.org/10.1080/10408340500526766

Bridges, N. (1985). *KRIGING; an Interactive Program to Determine The Best Linear Unbiased Estimation* (Open-File Report, pp. 85–112) [Open-File Report]. Geological Survey Open-File Report. https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr85112

Bronto, S., Hadisantoso, R. D., & Lockwood, J. P. (1982). *Peta Geologi Gunung Gamalama, Ternate, Maluku* [Map]. Pusat Vulkanologi Mitigasi dan Bencana Geologi (PVMBG).

Chen, K., Hwang, C., Chang, L., & Ke, C. (2018). Short-Time Geodetic Determination of Aquifer Storage Coefficient in Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *123*(12). https://doi.org/10.1029/2018JB016630

Darlan, Y., Raharjo, P., Darwis, N., Darmawan, B., & Prasetyo, H. (1997). Studi Mitigasi Bencana Alam Tsunami Di Wilayah Pesisir Jailolo Dan Sekitarnya Halmahera Maluku Utara. *Prosiding Ikatan Ahli Geologi Indonesia*, 781–797.

Daud, K., Pramoedyo, H., Afandhi, A., & Tama, I. P. (2022). *Hydrogeophysical, Environmental and Groundwater Potential Assessment in the Ternate Basin, North Maluku Province, Indonesia*. PHYSICAL SCIENCES. https://doi.org/10.20944/preprints202211.0055.v1

DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate Change and Water Scarcity: The Case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, *81*(3), 342. https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005

Ezebunanwa, A. C., Mbagwu, E. C., Onwuegbuchulam, C. O., Nwugha, V. N., & Chinaka, A. I. (2026). Spatial Distribution and Predictive Modeling of Aquifer Protective Capacity via Dar Zarrouk Parameter Analysis in the Lower Orashi River Area, South Eastern Nigeria. *Asian Journal of Geographical Research*, *9*(1), 256–268. https://doi.org/10.9734/ajgr/2026/v9i1372

Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, *4*(11), 945–948. https://doi.org/10.1038/nclimate2425

Faral, A., Lavigne, F., Mutaqin, B. W., Mokadem, F., Achmad, R., Ningrum, R. W., Lahitte, P., Hadmoko, D. S., & Mei, E. T. W. (2022). A 22,000-year tephrostratigraphy record of unidentified volcanic eruptions from Ternate and Tidore islands (North Maluku, Indonesia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *423*, 107474. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107474

Faust, N. L., Anderson, W. H., & Star, J. L. (1991). Geographic Information Systems and Remote Sensing Future Computing Environment. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, *Vol. 57, No. 6*, 655–668.

Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2013). Examining Urban Heat Island Relations to Land Use and Air Pollution: Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis for Thermal Remote Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *6*(3), 1749–1756. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2263425

Firman, F., Marsaoly, N., & Tuhuteru, E. (2022). Deteksi Muka Air Tanah Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Sclumberger di Kelurahan Sasa Kota Ternate. *JURNAL SIPIL SAINS*, *12*(1). https://doi.org/10.33387/sipilsains.v12i1.3804

Foster, S. (1987). *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution, and Protection Strategy*. TNO Committee on Hydrological Research.

Foster, S., & Loucks, D. P. (2006). Non-renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-sustainable Management for Water-policy Makers. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*.

Hadi, M. P., Salam, R., & Achmad, R. (2019). Groundwater resources mapping for small island using Geoelectrical Technique the case study of Ternate Island. *Indonesian Journal of Geography*, *51*(1), 49. https://doi.org/10.22146/ijg.41242

Hall, R., & Spakman, W. (2002). Subducted slabs beneath the eastern Indonesia–Tonga region: Insights from tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, *201*(2), 321–336. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00705-7

Hinton, J. C. (1996). GIS and remote sensing integration for environmental applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, *Vol. 10 No. 7*, 877–890. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02693799608902114

Hoffmann, J., & Sander, P. (2007). Remote sensing and GIS in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, *15*(1), 1–3. https://doi.org/10.1007/s10040-006-0140-2

Humas BAZNAS RI. (2023). *Kekeringan di Maluku Utara, BAZNAS Bantu Distribusikan Air Bersih*. https://baznas.go.id/baca-berita/kekeringan-di-maluku-utara-baznas-bantu-distribusikan-air-bersih/9oa1R6OW41cHRZT3RGM2hsd25TQT09

Ibuot, J. C., Obiora, D. N., Igwe, E. A., & Ugwu, N. M. (2025). Evaluation of groundwater vulnerability using index-based model approach within parts of Nsukka Sedimentary Basin, Nigeria. *Solid Earth Sciences*, *10*(2), 100232. https://doi.org/10.1016/j.sesci.2025.100232

Jha, M. K., Chowdary, V. M., & Chowdhury, A. (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, *18*(7), 1713–1728. https://doi.org/10.1007/s10040-010-0631-z

Kuang, X., Jiao, J. J., Zheng, C., Cherry, J. A., & Li, H. (2020). A review of specific storage in aquifers. *Journal of Hydrology*, *581*, 124383. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124383

MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó., & Taylor, R. G. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, *7*(2), 024009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009

Malczewski, J. A. (1999). *GIS and Multi Criteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons.

Margat, J., & Van Der Gun, J. (2013). Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. *CRC Press*.

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*,

6(2), 434–451. https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.07.001

NASA/Goddard Space Flight Center. (2024). NASA Satellites Reveal Abrupt Drop in Global Freshwater Levels. *ScienceDaily*. https://www.sciencedaily.com/releases/2024/11/241116195719.htm

Nurfaika, & Kasim, M. (2021). Pemetaan Potensi Air Tanah Dangkal Berbasis Sistem Informasi Geografi di Kecamatan Limboto Provinsi Gorontalo. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geografi*, *5*(2), 236–246. https://doi.org/10.29408/geodika.v5i2.4020

Parnadi, W. W., & Salam, R. (2022). Identifikasi Akuifer Air Tanah Di Kaki Gunung Api Gamalama Pulau Ternate Menggunakan Data Geolistrik Tahanan Jenis 2-Dimensi. *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, *9*(2), 65–78. https://doi.org/10.24252/jft.v9i2.33725

Pratama, W., Defwaldi, D., Fajrin, F., Armi, I., & Driptufany, D. M. (2024). Identifikasi Potensi Air Tanah Berbasis Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis di Kota Padang. *EL-JUGHRAFIYAH*, *4*(1), 26. https://doi.org/10.24014/jej.v4i1.25887

Purnama, S., Cahyadi, A., Sekaranom, A. B., Febriarta, E., Firmansyah, A. J., & Riyanto, I. A. (2023). Aquifer characteristics and groundwater potential for domestic requirements in Kediri Regency, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, *10*(2), 4081. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.102.4081

Rejekiningrum, P. (2009). *Peluang Pemanfaatan Air Tanah untuk Keberlanjutan Sumber Daya Air*. *3*(2).

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.

Shah, T. N. (2007). *The Groundwater Economy of South Asia: An Assessment of Size, Significance and Socio-ecological Impacts* (1st ed.). CAB International. https://doi.org/10.1079/9781845931728.0007

Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7

Soupios, P. M., Kouli, M., Vallianatos, F., Vafidis, A., & Stavroulakis, G. (2007). Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece). *Journal of Hydrology*, *338*(1–2), 122–131. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.028

Sudarmaji. (2006). Perubahan Kualitas Airtanah Di Sekitar Sumber Pencemar Akibat Bencana Gempa Bumi. *Forum Geografi*, *Volume 20 No. 2*. https://publikasiilmiah.ums.ac.id/bitstream/handle/11617/263/Sudarmadji.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater Hydrology*. Wiley.

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, *289*(5477), 284–288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284