



Identifikasi Akuifer Air Tanah Di Kaki Gunung Api Gamalama Pulau Ternate Menggunakan Data Geolistrik Tahanan Jenis 2-Dimensi

Wahyudi W. Parnadi^{1*} dan Ramdani Salam²

¹Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

²Program Studi Geografi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Khairun Ternate

Email: wahyudi.parnadi@itb.ac.id

*Corresponding Author

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sebaran akuifer air tanah dan intrusi air laut di kaki Gunung Api Gamalama di Pulau Ternate dengan menggunakan data resistivitas listrik 2 dimensi. Pulau ini pernah mengalami erupsi signifikan yang menyebabkan terbentuknya endapan baru di tubuhnya dan menyebabkan terbentuknya lapisan akuifer. Berukuran kecil namun dikelilingi air laut, Pulau Ternate mengalami intrusi air laut pada zona akuifer. Teknik ini kami lakukan pada sembilan jalur di bagian timur dan selatan pulau, yaitu jalur Bandara, FKIP, PDAM, Kayu Merah, Skep, Lapangan Fitu, Sasa, dan Takome. Setiap jalur memiliki panjang 75 meter hingga 230 meter dengan jarak elektroda 5 m hingga 10 m. Pengukuran ini dilakukan sejajar dengan garis pantai menggunakan dua konfigurasi elektroda: Wenner dan Wenner-Schlumberger. Hasil penelitian menunjukkan zona akuifer dengan nilai resistivitas 10 – 150 Ωm terdapat di bagian timur dan selatan pulau. Dari analisis parameter Dar Zarrouck ditemukan intrusi air laut di bagian timur pulau pada jalur PDAM dengan nilai resistivitas 1 – 10 Ωm . Zona menunjukkan nilai konduktansi tinggi dalam kisaran resistivitas rendah 3,01 hingga 3,41 Ohm. Bukti visual menunjukkan bahwa jalur PDAM ini terletak di pantai, di mana penduduk Ternate memanfaatkan air tanah secara berlebihan melalui sumur gali.

Kata kunci: Akuifer, Tahanan Jenis, Mt. Gamalama, Pulau Ternate.

Abstract

This study aimed to identify the distribution of groundwater aquifers and seawater intrusion at the foot of Gamalama Volcano on Ternate Island using 2-dimensional electrical resistivity data. This island has experienced significant eruptions that have caused new deposits to form on its body and have caused the formation of an aquifer layer. Small in size but surrounded by seawater, Ternate Island experiences seawater intrusion at the aquifer zones. We conducted this technique on nine lines in the eastern and southern parts of the Island, namely the Bandara, FKIP, PDAM, Kayu Merah, Skep, Lapangan Fitu, Sasa, and Takome lines. Each line has a length of 75 meters to 230 meters at 5 m to 10 m electrode spacing. This measurement was carried out parallel to the shoreline using two electrode configurations: the Wenner and the Wenner-Schlumberger. The results showed that aquifer zones with a resistivity value of 10 – 150 Ωm exist in the eastern and southern parts of the island. From the analysis of Dar Zarrouck parameters, we found seawater intrusion in the eastern part of the island on the PDAM lines with a resistivity value of 1 – 10 Ωm . The zones show high conductance

values in the low resistivity range of 3.01 to 3.41 Ohms. Visual evidence reveals that this PDAM line locates at the beach, where Ternate inhabitants utilize groundwater excessively through dug well.

Keywords: *Aquifer, DC Resistivity, Mt. Gamalama, Ternate Island.*

Info Artikel

Status artikel:

Diterima: 30 November 2022

Disetujui: 25 Desember 2022

Tersedia online: 30 Desember 2022

1. PENDAHULUAN

Daerah pesisir yang umumnya dataran merupakan daerah yang banyak dihuni oleh manusia dan menjadi pusat dari kegiatan sosial dan ekonomi [1]. Pertambahan penduduk yang terus meningkat pada daerah semacam itu menyebabkan meningkatnya kebutuhan akan air bersih untuk kegunaan rumah tangga, pertanian, kegiatan industri dan lain-lain [2, 3]. Ketersediaan airtanah dan air permukaan sangat dipengaruhi oleh kondisi klimatologi dari daerah tersebut. Disamping itu, kegiatan manusia juga mendegradasi ketersediaan airtanah. Penyedotan air yang berlebihan akan menurunkan kualitas dan kuantitas airtanah yang tersedia pada suatu daerah.

Pada umumnya, pulau yang berukuran kecil dengan luas kurang dari 2000 km², mempunyai akuifer airtanah yang bersumber dari hujan saja. Jika terdapat gunung pada pulau tersebut, topografinya sangat dipengaruhi oleh keberadaan gunung tersebut. Pada bagian puncak dan tengah, kondisi lerengnya sangat curam atau curam dan melandai pada bagian kaki gunung. Pada pulau yang kecil yang mempunyai gunung, air hujan akan dengan cepat dialirkan ke laut dengan sebagian kecil terserap kedalam tanah. Pengambilan airtanah melalui penyedotan di daerah pantai akan menyebabkan menurunnya permukaan airtanah yang akan terisi oleh air laut. Intrusi air laut ini menyebabkan menurunnya tingkat kualitas dan kuantitas air tanah dengan cepat [4, 5].

Untuk mengetahui potensi airtanah di suatu pulau vulkanik kecil, perlu dilakukan usaha pencitraan kondisi bawah tanah dan kemungkinan terdapatnya akuifer airtanah. Pencitraan ini hanya dapat dilakukan menggunakan metode geofisika. Salah satu metode geofisika yang terbukti handal dalam eksplorasi sumber air adalah metode geolistrik tahanan jenis [6]. Metode geolistrik tahanan jenis 2 D, yang dikenal juga sebagai *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) merupakan salah satu dari metode geofisika yang dapat menggambarkan distribusi tahanan jenis dalam arah vertikal dan lateral. Metode ini merupakan metode standar dalam eksplorasi air tanah. Akuifer airtanah pada kedalaman dangkal maupun dalam dapat dicitrakan baik dengan metode ini.

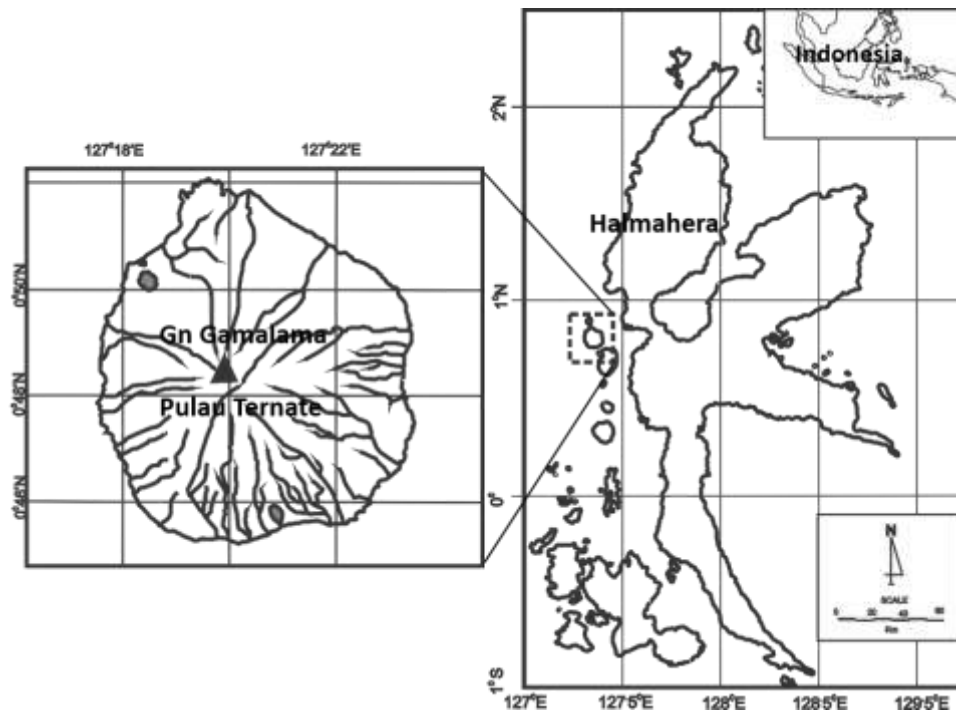
Pada teknik ini, arus listrik searah diinjeksikan kedalam bumi melalui sepasang elektroda arus dan beda potensial pada dua titik yang berada pada jarak tertentu diukur melalui sepasang elektroda potensial. Beda potensial tersebut menggambarkan potensial dari satu posisi titik tertentu di permukaan bumi yang berada pada pertengahan jarak antar elektroda pada pasangan elektroda potensial tersebut. Terdapat beberapa konfigurasi elektroda yang digunakan dalam pengukuran geolistrik tahanan jenis 2D. Salah satu konfigurasi yang umum digunakan dalam eksplorasi airtanah adalah konfigurasi Wenner dan Wenner-Schlumberger.

Daerah studi, yaitu kaki gunung api Gamalama, berada di Pulau Ternate dengan luas yang kecil yaitu 139,98 km² [7]. Dengan kondisi topografi yang curam pada bagian puncak dan melandai pada bagian kaki gunungapi Gamalama, air hujan dengan cepat akan mengalir kearah laut. Pemukiman penduduk sebagian besar berada pada daerah pesisir yang landai. Kebutuhan air bersih untuk kegiatan sehari-hari penduduk Ternate diambil melalui penyedotan airtanah. Pemerintah kota Ternate melalui PDAM menyediakan air bersih yang juga diambil melalui sumur penyedotan Akibat dari pengambilan airtanah yang berlebihan ini menyebabkan terjadi proses *upconing* yang menyebabkan air laut mendesak kearah daratan. Intrusi air laut ini menyebabkan air yang diambil oleh penduduk menjadi asin yang tidak memenuhi syarat untuk air minum [2, 8].

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kondisi bawah permukaan kaki Gunungapi Gamalama di Pulau Ternate dengan kemungkinan terdapatnya akuifer airtanah dan intrusi air laut dengan menggunakan metode geolistrik tahanan jenis 2D yang dibantu dengan analisisnya menggunakan konsep parameter Darr Zarrouck.

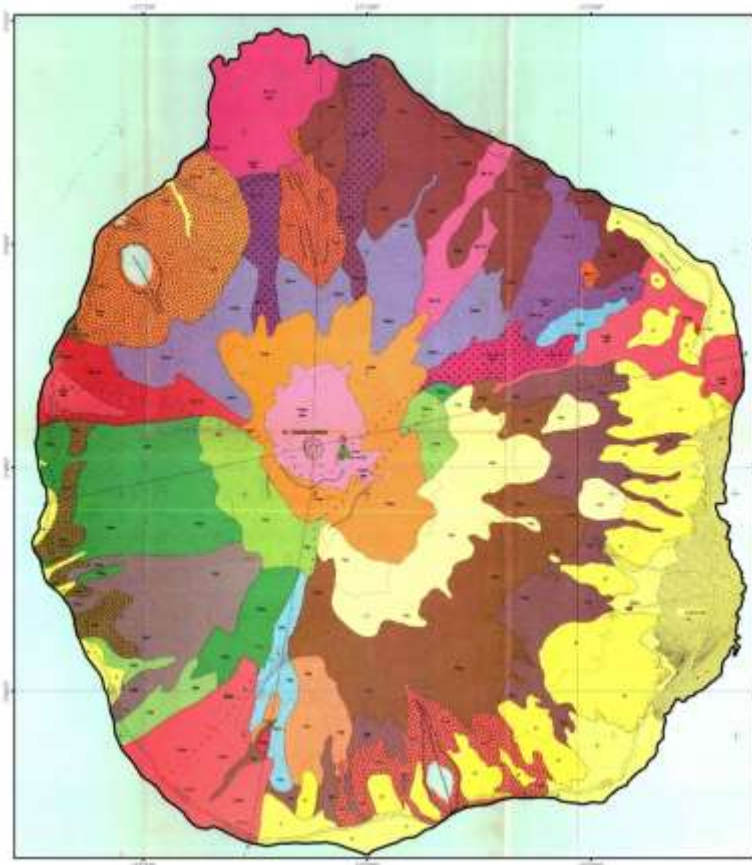
Lokasi dan Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian, yaitu kaki gunung api Gamalama terletak di Pulau Ternate yang merupakan pulau volkanik kecil [7]. Pulau ini merupakan pulau kota dengan sebaran penduduk yang relatif merata dalam bentuk spot-spot. Pulau Ternate terletak di sebelah barat Pulau Halmahera seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi daerah studi Pulau Halmahera.

Secara umum daerah penelitian tersusun atas material piroklastik yang terbentuk akibat dari beberapa erupsi besar Gunungapi Gamalama [8]. Batuan penyusun Pulau Ternate dibagi menjadi tiga kelompok pembentuk batuan, yaitu Gamalama Tua (Gt), Gamalama Dewasa (Gd) dan Gamalama Muda (Gm). Tiga kelompok batuan ini menghasilkan endapan gunung api yang masing-masing dibagi menjadi kelompok batuan. Endapan Gt dibagi menjadi 6 satuan endapan, GD menjadi 7 satuan endapan, sedangkan GM dibagi menjadi 17 satuan endapan. Disamping dua satuan endapan diatas, terdapat dua endapan lain yang merupakan endapan permukaan yaitu Aluvium (Al) dan endapan Piroklastik rombakan (Pr) yang merupakan hasil rombakan endapan-endapan Gt, Gd, dan Gm. Rincian lengkap tentang geologi Pulau Ternate bisa dilihat pada peta geologi pada Gambar 2.



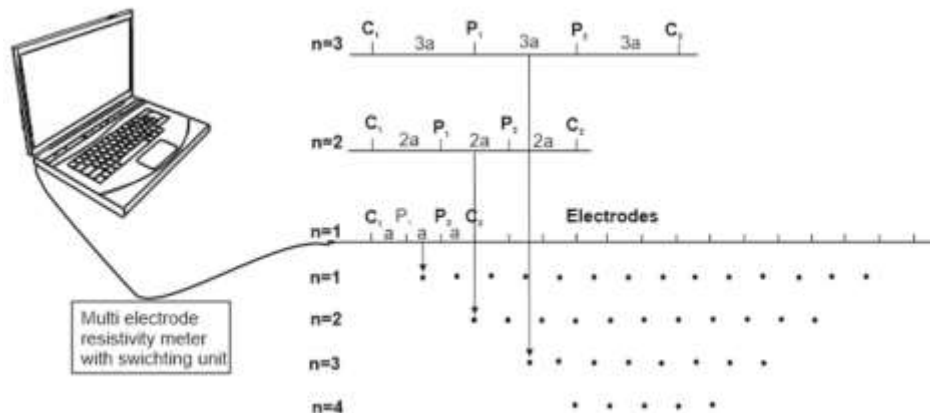
Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian [8].

Keberadaan Gunungapi Gamalama dengan ketinggian 1.715m diatas permukaan laut menyebabkan sering terjadi hujan orografis. Curah hujan rata-rata tahunan adalah 1.324 mm/tahun selama periode 2003 – 2013 dengan jumlah rata-rata hari hujan 200 hari/tahun. Curah hujan terendah terjadi di bulan agustus dan tertinggi di bulan Desember. Iklim pulau Ternate termasuk pada klasifikasi B, yaitu iklim daerah basah dengan ciri vegetasi hutan hujan tropis [2]. Temperatur udara rata-rata Pulau Ternate dalam periode 2007 – 2013 adalah 26,4 °C dengan temperatur terendah sebesar 26,9 °C pada bulan Juli dan September, sedangkan temperatur tertinggi sebesar 31,3 °C pada bulan Oktober. Kelembaban udara rata-rata Pulau Ternate dalam kurun waktu 2007 – 2013 sebesar 82,6 %. Kelembaban udara tertinggi pada kurun waktu tersebut adalah 84,8 % yang terjadi pada bulan Januari, sedangkan kelembaban udara terendah terjadi pada bulan September sebesar 79,9 %.

2. METODE PENELITIAN

Teknik Pengukuran Geolistrik Tahanan Jenis 2-Dimensi

Gambar 3 memperlihatkan secara skematik, pengukuran geolistrik tahanan jenis 2D.



Gambar 3. Pengukuran geolistrik tahanan jenis 2D menggunakan Konfigurasi Wenner. Data nilai pengukuran tahanan jenis semu ρ_a diplot dengan aturan tertentu pada penampang semu.

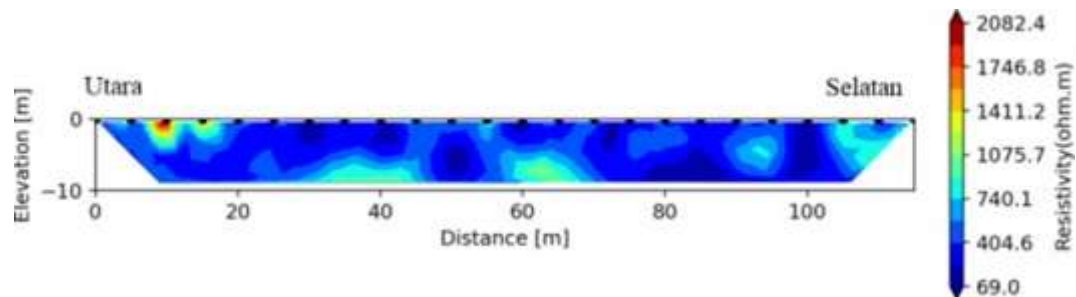
Gambar 1 memperlihatkan secara skematik teknik pengukuran geolistrik tahanan jenis 2D dengan konfigurasi elektroda Wenner dan tampilan datanya pada penampang semu. Pada konfigurasi Wenner, jarak antar elektroda adalah konstan yang merupakan kelipatan bulat n dari jarak antar elektroda paling kecil ($=a$) [9, 10]. Data tersebut kemudian menjalani proses perhitungan inversi untuk mendapatkan distribusi nilai tahanan jenis yang dianggap mewakili kondisi sebenarnya [11, 12].

Akuisisi Data Geolistrik Tahanan Jenis 2-Dimensi

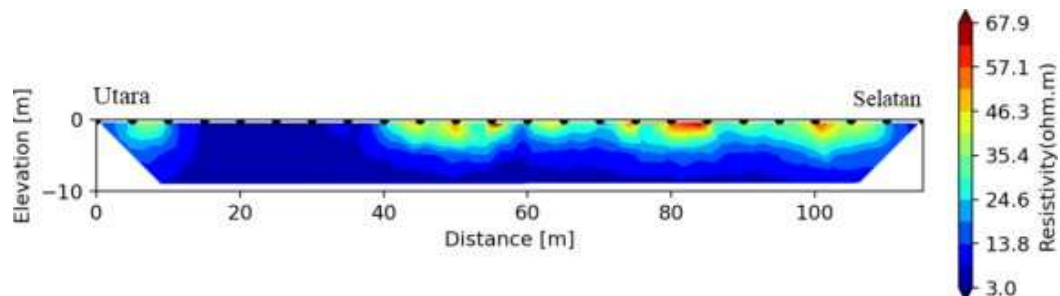
Pengukuran geolistrik tahanan jenis 2D (untuk selanjutnya disebut ERT yang merupakan singkatan dari *Electrical Resistivity Tomography*) dilakukan sebanyak 9 lintasan yang tersebar di kaki Gunungapi Gamalama Pulau Ternate. Sembilan lintasan ERT tersebut – dengan penomoran dari 1 sampai dengan 9 – adalah lintasan-lintasan Bandara Babullah, FKIP Unkhair, kantor PDAM, Jalan Skep, lapangan bola Kayu Jalan Kalumata, Lapangan Fitu, Sasa, dan Takome TPA. Pengukuran ERT dilakukan menggunakan peralatan ARES dengan konfigurasi elektroda Wenner dan Wenner-Schlumberger dan spasi elektroda yang berbeda-beda antara 5 m dan 10 m. Panjang lintasan 1 hingga lintasan 4, lintasan 6, lintasan 8 dan lintasan 9 mempunyai panjang 115 m dengan spasi elektroda 5 m, sedangkan lintasan 5 mempunyai panjang 230 m dengan spasi elektroda 10 m. Khusus untuk lintasan 7, panjang lintasan tersebut 75 m dengan spasi elektroda 5 m. Ke 9 lintasan tersebut mempunyai arah sejajar dengan garis pantai disebabkan kondisi medan yang tidak mungkin untuk dilakukan

pengukuran tegak lurus pantai. Data hasil akuisisi kemudian diolah lanjut untuk memperoleh penampang resistivitas 2D bawah permukaan melalui proses inversi.

Pengolahan data ERT dilakukan menggunakan perangkat lunak ResIpy [11, 12]. Data tahanan jenis 2D yang diperoleh dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu penampang geolistrik 2D yang tidak terkena intrusi air laut dan penampang geolistrik 2D yang terkena intrusi air laut. Gambar 4 dan 5 sebagai contoh adalah penampang geolistrik 2D yang masing-masing mewakili kelompok yang tidak terkena intrusi air laut dan yang terkena intrusi air laut.



Gambar 4. Penampang tahanan jenis lintasan AA (Bandara Babullah).



Gambar 5. Penampang tahanan jenis lintasan 3 (PDAM).

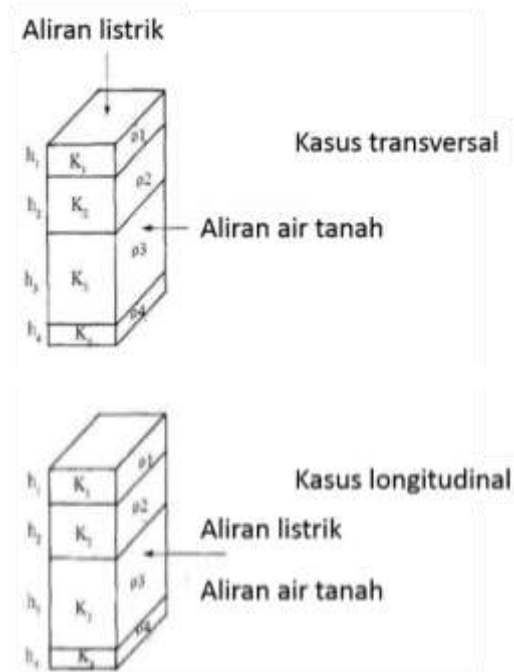
Parameter Dar Zarrouck

Parameter Dar Zarrouck berupa konduktansi longitudinal S dan resistansi transversal T . Parameter ini digunakan sebagai alat bantu analisis data sounding pada perlapisan yang horizontal (Gambar 6) [3]. Nilai konduktansi longitudinal S dan nilai resistansi T didapatkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\rho_i} \quad (3)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (4)$$

dengan S merupakan konduktansi longitudinal (Ω^{-1}), T resistansi vertikal (Ω^{-1}), h ketebalan lapisan ke - i (m), dan ρ_i nilai resistivitas lapisan ke - i (Ωm).

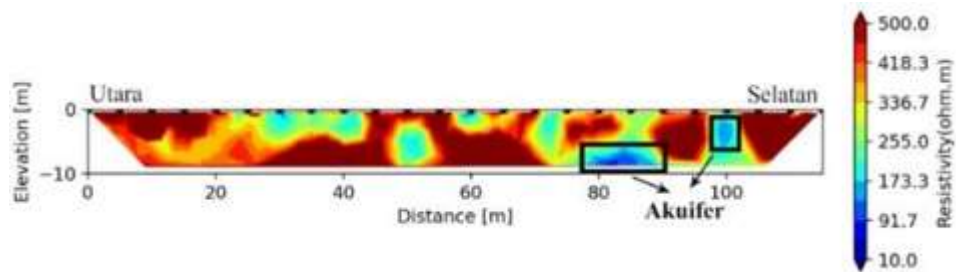


Gambar 6. Diagram skematik yang memperlihatkan konduktansi longitudinal (bawah) dan resistansi vertikal (atas) (modifikasi [1]).

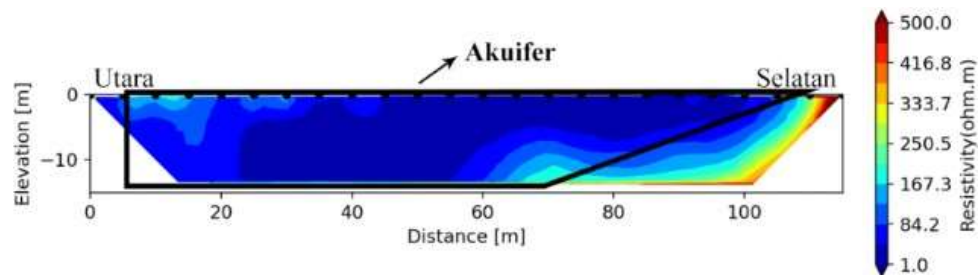
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Interpretasi data ERT

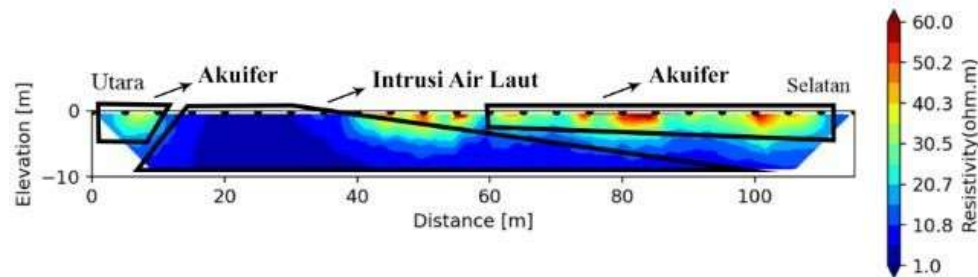
Berdasarkan peta geologi gunungapi Gamalama, daerah penelitian berada pada daerah endapan aluvium, endapan piroklastika rombakan, dan endapan gunungapi Gamalama muda [8]. Berdasarkan geologi regionalnya, lintasan 1 – 9 dapat dikelompokkan menjadi 3, yaitu lintasan 1, 3, 5, dan 7 merupakan lintasan yang berada pada daerah endapan aluvium dengan litologi batuan lanau, pasir, dan kerikil. Lintasan 2, 6, dan 9 merupakan lintasan yang berada pada daerah endapan Gamalama muda (Gm). Lintasan 2 merupakan lintasan pada endapan Gamalama muda lahar muda (Gmlm) dengan litologi batuan bongkah andesit dan andesit basal, sedangkan lintasan 6 merupakan lintasan pada endapan Gamalama muda letusan freatik maar laguna (Gmft) dengan litologi batuan breksi. Lintasan 9 merupakan lintasan pada endapan Gamalama muda lahar tua (Gmlt) dengan Litologi batuan andesit basal. Lintasan 8 merupakan lintasan yang berada pada daerah endapan Gamalama tua, yaitu endapan lahar (Gtla) dengan litologi batuan lava andesit dan abu gunungapi. Gambar 7 – 15 memperlihatkan penampang tahanan jenis yang diinterpretasikan, masing-masing dari lintasan 1 sampai lintasan 9.



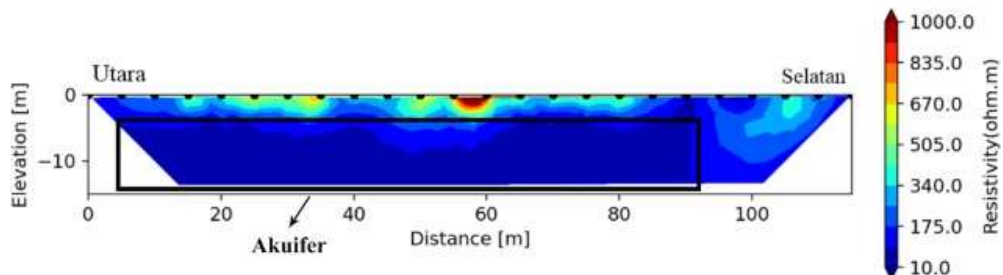
Gambar 7. Penampang tahanan jenis lintasan 1 (Bandara) yang diinterpretasikan. Akuifer ditandai oleh segi empat hitam.



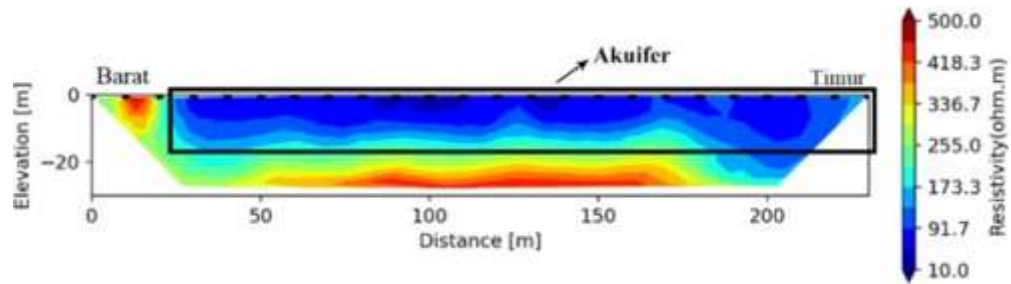
Gambar 8. Penampang tahanan jenis lintasan lintasan 2 (FKIP)



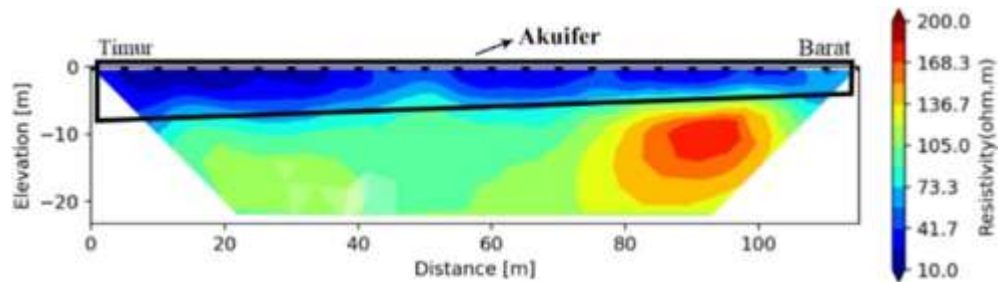
Gambar 9. Penampang tahanan jenis lintasan lintasan 3 (PDAM)



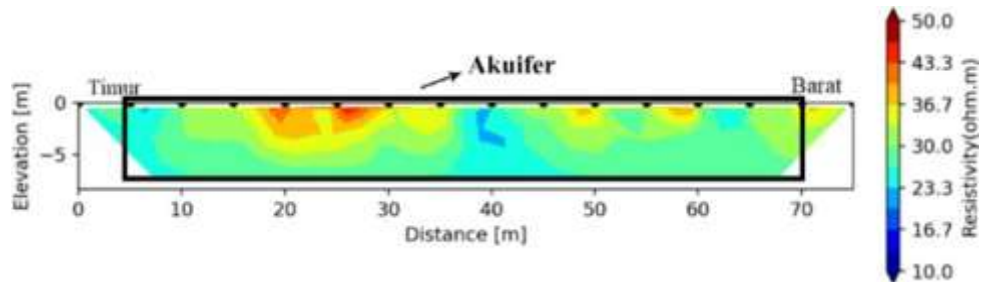
Gambar 10. Penampang tahanan jenis lintasan Lapangan 4 (Kayu Merah).



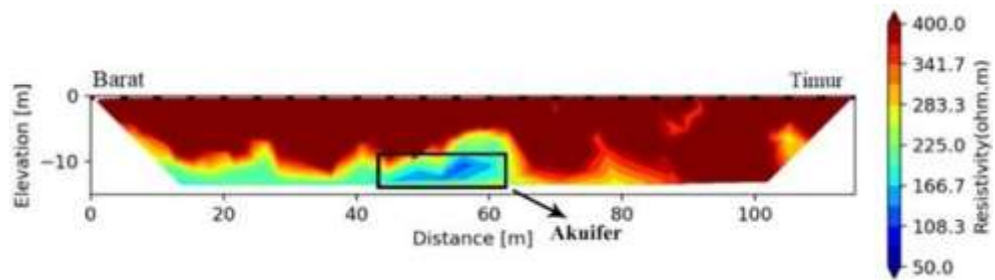
Gambar 11. Penampang tahanan jenis lintasan 5 (Skep).



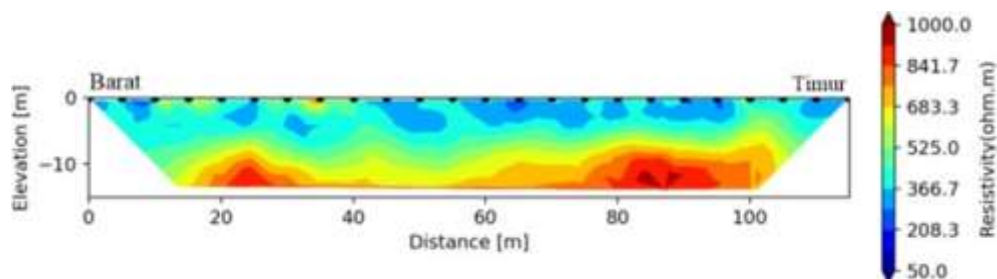
Gambar 12. Penampang tahanan jenis lintasan 6 (Kalumata).



Gambar 13. Penampang tahanan jenis lintasan 7 (Lapangan Fitu).



Gambar 14. Penampang tahanan jenis lintasan 8 (Sasa).



Gambar 15. Penampang tahanan jenis lintasan 9 (Takome).

Menurut Salam dkk. [13], Barlow [14], dan Ardinesari dkk. [15], nilai resistivitas air laut bervariasi dari rentang $0,1 \Omega\text{m}$ hingga kurang dari $10 \Omega\text{m}$. Nilai resistivitas air tanah yang terkena intrusi air laut bervariasi dari rentang lebih dari $10 \Omega\text{m}$ hingga kurang dari $30 \Omega\text{m}$. Nilai resistivitas air tanah bervariasi dari rentang lebih dari $30 \Omega\text{m}$ hingga lebih dari $100 \Omega\text{m}$.

Berdasarkan peta geologi regional gunungapi Gamalama, lintasan 1, 3, 4, 5, dan 7 terdapat lapisan akuifer dari rentang nilai resistivitas $10 - 150 \Omega\text{m}$ dengan litologi batu pasir, namun ada beberapa lintasan yang mengalami intrusi air laut yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas $1 - 10 \Omega\text{m}$. Pada lintasan ini juga terdapat beberapa lintasan yang masih dipengaruhi oleh sisa-sisa material vulkanik berupa batuan andesit basal yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas $150 - 1000 \Omega\text{m}$.

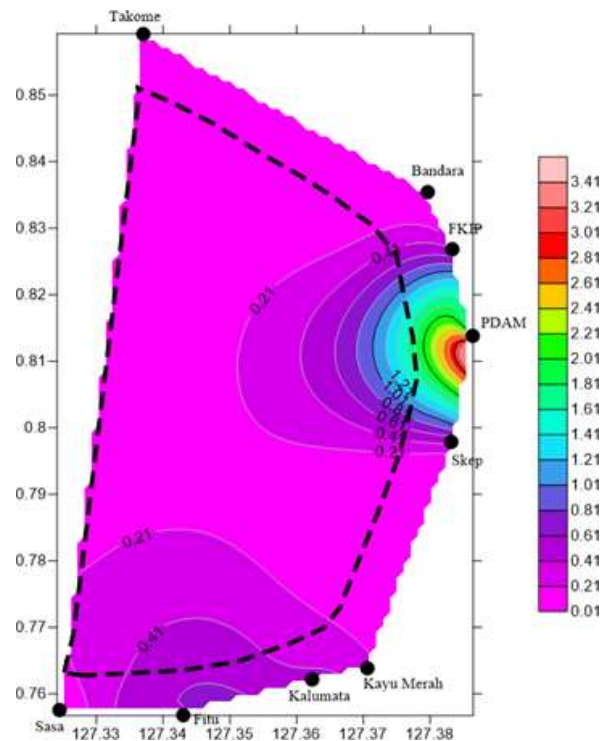
Lintasan yang diduga mengalami intrusi air laut adalah lintasan 3 (PDAM). Intrusi air laut pada lintasan ini dapat terjadi disebabkan oleh pengeboran air tanah didekat garis pantai yang cukup banyak mengingat bahwa lintasan ini merupakan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) sehingga diduga terjadinya pengambilan air tanah yang berlebihan dan tidak memperhitungkan kemampuan batuan dalam mengembalikan air tanah.

Lintasan yang masih dipengaruhi oleh sisa-sisa material vulkanik (andesit basal) adalah lintasan 1, 4, dan 5. Lintasan ini masih dipengaruhi oleh sisa-sisa material vulkanik karena pada geologi regional daerah penelitian, endapan aluvium pada lintasan tersebut masih berdekatan dengan endapan vulkanik/Gamalama muda.

Lintasan 2 dan 9 merupakan lintasan endapan Gamalama muda Gmlm dan Gmlt dengan litologi batu andesit basal dengan nilai resistivitas $150 - 1000 \Omega\text{m}$, namun pada lintasan 2 masih dipengaruhi oleh lapisan akuifer (nilai resistivitas $10 - 150 \Omega\text{m}$) karena daerah pada lintasan 2 berdekatan dengan endapan aluvium. Lintasan 6 merupakan lintasan endapan Gamalama muda Gmft dengan litologi batu breksi dengan nilai resistivitas $100 - 200 \Omega\text{m}$, namun pada lintasan ini masih dipengaruhi oleh lapisan akuifer yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas $10 - 100 \Omega\text{m}$. Lintasan 8 merupakan lintasan endapan Gamalama tua Gtla dengan litologi batuan lava andesit dan abu vulkanik dengan nilai resistivitas $100 - 10000 \Omega\text{m}$.

Peta persebaran nilai konduktansi longitudinal S

Dari perhitungan nilai parameter Dar Zarrouck, hanya nilai sebaran konduktansi yang dipakai dalam interpretasi. Nilai konduktansi longitudinal S dihitung menggunakan data tahanan jenis 2D pada lokasi-lokasi yang ditentukan. Persebaran nilai konduktansi longitudinal S dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 16. Peta sebaran nilai konduktansi longitudinal S daerah studi.

Peta persebaran nilai konduktansi didapatkan dengan interpolasi nilai konduktansi tiap lintasan. Garis putus-putus pada Gambar 16 menunjukkan daerah sebaran nilai konduktansi di daerah yang tidak terdapat data riil, sehingga tidak digunakan dalam pembahasan ini. Nilai konduktansi berbanding terbalik dengan nilai resistivitas, sehingga semakin tinggi nilai konduktansinya maka nilai resistivitasnya semakin rendah. Nilai konduktansi yang semakin tinggi menunjukkan kemungkinan adanya zona intrusi air laut, nilai konduktansi yang rendah menunjukkan kemungkinan adanya zona akuifer dan nilai konduktansi yang sangat rendah diduga merupakan lapisan dengan litologi andesit basal (Ardenaswari dkk, 2016). Berdasarkan Gambar 16 dapat dilihat bahwa nilai konduktansi yang terbesar berada pada rentang 3,01 – 3,41 Ω^{-1} , yaitu pada lintasan 3 (PDAM), nilai konduktansi yang rendah berada pada rentang 0,21 – 0,41 Ω^{-1} , yaitu pada lintasan 2 (Fkip), 4 (Kayu Merah), dan 5 (Skep), 6 (Kalumata), 7 (Fitu), dan nilai konduktansi yang sangat rendah berada pada nilai konduktivitas kurang dari 0,21 Ω^{-1} , yaitu pada lintasan 1 (Bandara), 8 (Sasa), dan 9 (Takome). Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui daerah yang mengalami

intrusi air laut adalah lintasan 3 (PDAM) dan daerah yang berpotensi adanya akuifer terbesar adalah lintasan 2 (Fkip), 4 (Kayu Merah), dan 5 (Skep), 6 (Kalumata), dan lintasan 7 (Fitu).

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelannya, diduga daerah penelitian didominasi oleh lintasan yang berpotensi adanya lapisan akuifer dengan rentang nilai resistivitas 10 – 150 Ωm . Lintasan yang berpotensi akuifer yaitu lintasan pada bagian Timur dan beberapa lintasan di bagian Selatan Ternate dan hanya bagian Utara dan beberapa di bagian Selatan yang tidak berpotensi adanya akuifer. Berdasarkan hal tersebut, potensi air tanah di Pulau Ternate dapat dikategorikan sangat baik. Berdasarkan hasil pengolahan data 2D diduga terdapat daerah yang mengalami intrusi air laut yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas 1 – 10 Ωm , yaitu pada lintasan 3 (PDAM) didukung oleh peta persebaran nilai konduktansinya, lintasan 3 (PDAM) berada pada zona dengan nilai konduktivitas yang tinggi, yaitu dari rentang 3,01 – 3,41 Ω^{-1} . Intrusi air laut pada lintasan ini dapat terjadi karena lintasan yang berada dekat dengan air laut dan pemanfaatan air bersih secara berlebihan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini sebagian didanai dari dana PPMI 2021 Institut Teknologi Bandung dan dana penelitian Universitas Khairun, Ternate. Penulis mengucapkan terimakasih kepada para mahasiswa Universitas Ternate yang membantu dalam akuisi data geolistrik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mahmud, S., Hamza, S., Irfan, M., Huda, S. N., Burke, F., & Qadir, A. (2022). Investigation of groundwater resources using electrical resistivity sounding and Dar Zarrouk parameters for Uthal Balochistan, Pakistan. *Groundwater for sustainable development*, 17, 100738. 2352-801X/© 2022. DOI:10.1016/j.gsd.2022.100738.
- [2] Salam, R. (2017). Tipologi akuifer pada bentuklahan marin dan bentuk lahan gunungapi di Pulau Ternate: *disertasi*.
- [3] Sinha, R., Israil, M., & Singhal, D. C. (2009). A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters of anisotropic aquifers. *Hydrogeology J*, 17, 495-503.
- [4] Chen, T.-T., Hung, Y.-C., Hsueh, M.-W., Yeh, Y.-H., & Weng, K.-W. (2018). Evaluating the application of Electrical Resistivity Tomography for investigating seawater intrusion: *electronic*, 7, 107.
- [5] Goebel, M., Knight, R., & Halkjaer, M. (2019) Mapping saltwater intrusion with an airborne electromagnetic method in the offshore coastal environment, Monterey Bay, California. *J. Hydrology: Regional Studies*, 23, 100602.
- [6] Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Netherlands.

- [7] Mulyono, P. F., & Putro, H. (2019). Analisis Ketahanan Air di Kota Ternate Provinsi Maluku Utara. *Jurnal Teknik Pengairan*, 120-125.
- [8] Bronto, S., Hadisantono, R. D., & Lockwood, J. P. (1982). *Peta Geologi Gunungapi Gamalama, Ternate, Maluku Utara*. Direktorat Vulkanologi.
- [9] Huraju, G. S., As'ari, & Tongkukut, S. H. (2015). Identifikasi Patahan Manado dengan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner di Kota Manado. *Jurnal Ilmiah Sains*.
- [10] Broto, S., & Afifah, R. S. (2008). Pengolahan Data Geolistrik dengan Metode Schlumberger. *Jurnal Teknik*.
- [11] Binley, A., & Slater, L. (2020). *Resistivity and induced polarization -- theory and applications to the near-surface earth*.
- [12] Blanchy, G., Saneiyan, S., Boyd, J., McLachlan, P., & Binley, A. (2020). *ResIPy an Intuitive Open Source Software for Complex Geoelectrical Inversion/Modeling*. Lancaster.
- [13] Salam, R., Sunarto, S., & Santosa, L. W. (2018). Penentuan kedalaman interface pada bentuklahan lereng gunungapi bawah dan bentuklahan dataran alluvial kepebisiran di Pulau Ternate. *POSITRON*. 8(1). 8-14.
- [14] Barlow, P. M. (2003). *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. Virginia: U.S. Geological Survey.
- [15] Ardaneswari, T. A., Yulianto, T., & Putranto, T. (2016). Analisis Intrusi Air Laut Menggunakan Data Resistivitas dan Geokimia Air Tanah di Dataran Aluvial Kota Semarang. *Youngster Physics Journal*. 335-350.