

DAFTAR PUSTAKA

- Abderahman, A., 2019. Magnetotelluric Deep Into Ground Water Exploration. Helwan: Geology Department, Faculty of Science, Helwan University.
- Agung, L., 2009, Pemodelan Sistem Geothermal dengan Menggunakan Metode Magnetotelurik di Daerah Tawau, Sabah, Malaysia, Universitas Indonesia, Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Depok, (Skripsi).
- Aveta, B. M., Hadian, M. S. D., dan Firmasyah, Y., 2022. Potensi Air Tanah di Utara Kota Bandung dan Sekitarnya. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 6(4):1039.
- Aidu, 2020. Operation Manual, Electrical Method and MT using ADMT-300HT2
- Aswan, M., Sampurno, J., & Putra, Y. S., 2014. Studi Rembesan Polutan Sampah Berdasarkan Metode Konduktivitas Elektromagnetik di Sekitar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Batulayang Kota Pontianak. *PRISMA FISIKA*, 2(1): 23.
- Bassey, E. N., Ajani, O. O., Adeniji, A. A., & Isah, A. G., 2023. Geophysical Investigation of Groundwater Potential in Iwo, Osun State, Southwestern Nigeria Using Audiomagnetotelluric Method. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4453024>
- Berktdol, A. (1983). Electromagnetic studies in geothermal regions. *Geophysical Surveys*.
- Buttler, D. K., 2010, Near Surface Geophysics. The McGraw-Hill Companies, Inc., United States.
- Cagniard, L. (1953). Basic Theory Of The Magneto-Telluric Method Of Geophysical Prospecting. *Geophysics*.
- Darsono, D. (2016). Identifikasi Akuifer Dangkal dan Akuifer Dalam dengan Metode Geolistrik (Kasus: di Kecamatan Masaran). *Indonesian Journal of Applied Physics*, 6(1): 41.
- Djainal, H. (2016). Karakteristik Mata Air Panas Daerah Panas Bumi Desa Akesahu Gamsungi Kecamatan Jailolo Timur Kabupaten Halmahera Barat Propinsi Maluku Utara. *DINTEK*, 9(2): 4.



B., 1982. *Electromagnetic Surveying in Current Middle Eastern Archaeology: Application and Evaluation*, Society of Exploration Geophysicists Press, Washington DC.

- Goff, F., & Janik, C. J., 2000. Geothermal systems, in Sigurdsson, H., ed., Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press: San Diego.
- Grandis, H. (2009). Pengantar Pemodelan Inservasi Geofisika. Institut Teknologi Bandung: Bandung
- Grandis, H. (2013). Metoda Magnetotellurik (MT). Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Halawa, A., Lismawaty, dan Tanjung, H. K., 2022. Survey Zona Lapuk Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas Pada Kilomter 37 Medan Berastagi. *Jurnal Sains dan Teknologi IST*, 17(2): 120-121.
- Kadir, T.V.S., 2011, Metode Magnetotellurik (MT) Untuk Eksplorasi Panas Bumi Daerah Lili, Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi, Universitas Indonesia, Kekhususan Geofisika Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Depok, (Skripsi).
- Keller, G. V., & Frischnecht F.C., 1966. Electrical Methode in Geophysical Prospecting. Pergamon Press: Oxford.
- Kruseman, G.P., & de Ridder, N.A. 2000. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands.
- Lehr, J. H., & Keeley, J. (2005). *Water encyclopedia: water quality and resource development*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lowrie, W., (2020). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.
- Marjoribanks, R., 1997. Geological interpretation of the Gosowong region, Halmahera Island, Indonesia. Internal report prepared for PT Nusa Halmahera Minerals.
- Milsom, J., 2003. Field Geophysics, 3rd Edition. England: John Willey & Sons Ltd.
- Nwako, R. C., & Udo, A. A., 2021. Investigation of Groundwater Aquifer Contamination due to Leachate Intrusion Using a High Resolution Real-Time Resistivity Technuqe at a Dumpsite around the University of Port Harcourt Environs, Choba, Rivers State, South-South, Nigeria. *International Journal of Environmental Studies Research*. 9(3): 53-63.



J.M., 1995. An Introduction applied and Environmental Geophysics: North Wales, UK Willey.

- Riputra, B. Y., & Malik, U. (2021). Survei Sumber Air Panas Dengan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner (Studi Kasus: Wisata Air Panas Pawan, Pasirpangaraian). *Komunikasi Fisika Indonesia*, 18(2): 147.
- Ronal, D. S., Daryono, S. K., Maskuri, F., 2015. Geologi dan Anomali Geokimia Daerah Takome, Kecamatan Kao Teluk Kabupaten Halmahera Utara, Maluku Utara. *Jurnal Ilmiah Geologi Pange*. 2(2): 42.
- Sampurno, Joko., (2015). Aplikasi Metode Elektromagnetik Untuk Identifikasi Akuifer Di Taman Universitas Tanjungpura. *SEMIRATA 2015*, 2(1).
- Santoso, Djoko., 2002. Pengantar Teknik Geofisika. Bandung : Penerbit ITB.
- Saptadji, N. M. (2001). Teknik Panas Bumi. *Bandung, Penerbit ITB*.
- Saputra, Adji Dwi, 2019. *Analisa Kinerja Kipas Utama Pada Tambang Bawah Tanah Toguraci di PT. Nusa Halmahera Minerals, Maluku Utara*. Tugas Akhir. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah.
- Satrio, A., dan Koesuma, S., 2012. Identifikasi Panas Bumi di Daerah Ngijo dan Pablengan Karangayar Menggunakan Metode Audio Magnetotelluric. *Indonesia Journal of Applied Physics*, 2(2): 199.
- Seran, R., & Edi, E., 2021. “Kajian Geofisika dan Geokimia Mangan di Desa Oetalus Kabupaten TTU”. *Indonesia Journal of Applied Physics*. 11(1): 42.
- Smart Resource Indonesia, 2020. Manual Book AGR (ADMT Golden Rod) (Prinsip Kerja Instrumen, Pengukuran, Pengoperasian dan Interpretasi). Bandung.
- Stratigrafi Gosowong (PT. Nusa Halmahera Mineral).
- Suroto, J. B., Rabbani, R. Latif, A. A., dan Aesh, P. B., 2018. Sistem Dewatering Air Panas Tambang Bawah Tanah Toguraci PT. Nusa Halmahera Minerals. *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 1(1): 36.
- Syahrwanti, H., Arman, Y., Ivansyah, O., dan Kholid, M., 2014. Aplikasi Metode Magnetotelluric Untuk Pendugaan Reservoir Panas Bumi (Studi Kasus: Daerah Mata Air Panas Cubadak, Sumatera Barat). *POSITRON*, 4(2): 71-72.
- Todd, D. K. (1980). Groundwater Hydrology (p. 535). *New York: Jon Wiley & Sons Inc*.
- Wolos P, 1998. *40Ar/39Ar Analyses, Gosowong Prospect Area, Halmahera*. unpublished report for P.T. Nusa Halmahera Minerals.



LAMPIRAN 1

PERSAMAAN DASAR ELEKTROMAGNETIK

Persamaan maxwell merupakan hukum yang menjelaskan perilaku gelombang EM diformulasikan sebagai berikut (Keller dan Frischknecht, 1966):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

Dari rumus vektor identitas ($\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \cdot \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A}$), diperoleh persamaan gelombang medan listrik dalam domain waktu sebagai berikut:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (2.10)$$

Substitusikan persamaan (II.2) menjadi:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.12)$$



Sehingga, didapatkan persamaan gelombang medan listrik dalam domain waktu yang didefinisikan sebagai:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.13)$$

Dengan cara yang sama didapatkan persamaan gelombang medan magnet sebagai berikut:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times (\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.16)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{B} - \nabla^2 \mathbf{B}) = \nabla \times (\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.17)$$

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma (\nabla \times \mathbf{E}) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) \quad (2.18)$$

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \quad (2.19)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

Sehingga, didapatkan persamaan gelombang medan magnet dalam domain waktu yang didefinisikan sebagai:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

Jika variasi terhadap waktu dapat dipresentasikan oleh fungsi periodik sinusoidal maka:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.23)$$

, persamaan gelombang medan listrik dalam domain waktu menjadi:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.23)$$



$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}) \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \mu_0 \sigma + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.25)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} \mu_0 \sigma + \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (2.26)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.27)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{E} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{E} \quad (2.28)$$

Pada persamaan gelombang medan magnet dalam domain waktu menjadi:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2.29)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz}) + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz}) \quad (2.30)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{B}_0 e^{i\omega t - kz} \quad (2.31)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{B} + \mu_0 \varepsilon_0 i^2 \omega^2 \mathbf{B} \quad (2.32)$$

Perambatan dalam medium bumi menyebabkan gelombang yang merambat memiliki frekuensi rendah maka $\sigma > \varepsilon \omega$. Sehingga dapat dituliskan:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{E} \quad (2.33)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma i \omega \mathbf{B} \quad (2.34)$$

Dengan:

$$k^2 = i \omega \sigma \mu_0 \text{ atau } k = \sqrt{i \omega \sigma \mu_0} \quad (2.35)$$

Didapatkan persamaan gelombang EM sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = k^2 \mathbf{E} \quad (2.36)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = k^2 \mathbf{B} \quad (2.37)$$



LAMPIRAN 2

PRINSIP KERJA ALAT ADMT 300HT2

Berdasarkan prinsip bahwa gelombang elektromagnetik dari frekuensi yang berbeda memiliki *skin depth* yang berbeda pada media konduktif, urutan respon elektromagnetik bumi dari frekuensi tinggi ke frekuensi rendah diukur di permukaan untuk mempelajari perbedaan variasi listrik badan geologi bawah tanah pada kedalaman yang berbeda dan menentukan genesanya (Smart Resources Indonesia, 2020):

1. Teori Perambatan Gelombang Elektromagnetik atau Persamaan Helmholtz

Gelombang elektromagnetik bumi diinjeksikan ke dalam tanah, dimana perambatan gelombang elektromagnetik pada batuan dan tanah mengikuti persamaan Maxwell. Jika sebagian besar batuan dan tanah bawah tanah diasumsikan nonmagnetik dan konduktivitasnya seragam secara makroskopis tanpa akumulasi muatan, persamaan Maxwell dapat direduksi menjadi:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 H + k^2 H &= 0 \\ \nabla^2 E + k^2 E &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Dimana k disebut dengan bilangan gelombang (koefisien propagasi):

$$k = [\omega^2 \mu \epsilon - i \omega \sigma \mu]^{\frac{1}{2}}$$

$$k = b + ia$$

Koefisien rambat adalah k suatu bilangan kompleks, maka: a disebut dengan koefisien absorpsi. Ketika k lebih disederhanakan sebagai berikut:

$$k = -i \omega \mu \sigma$$



Hubungan antara Bilangan Gelombang dan Resistivitas serta Hubungannya dengan Konduktivitas:

$$\frac{E}{H} = -\frac{i\omega\rho}{k}$$

Impedansi permukaan (Z) didefinisikan sebagai rasio medan listrik permukaan terhadap komponen horizontal medan magnet. Dalam kasus tanah yang homogen, impedansinya tidak bergantung pada polarisasi medan datang dan terkait dengan resistivitas tanah dan frekuensi medan elektromagnetik. Maka diperoleh persamaan:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\omega\mu\rho e^{i\pi/4}}$$

Persamaan di atas dapat digunakan untuk menentukan resistivitas listrik bumi (ρ):

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2$$

Pada media nonmagnetik rumus *skin depth* adalah:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\rho/f}$$



LAMPIRAN 3

CARA MENDAPATKAN SKIN DEPTH (δ)

Dimana:

$$k^2 = i\omega\mu_0\sigma$$

$$k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$$

$$k = \sqrt{i}\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{\mu_0\omega\sigma} \\ &= \sqrt{\frac{\mu_0\omega\sigma}{2}} + i\sqrt{\frac{\mu_0\omega\sigma}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{\mu_0\omega\sigma}{2}} \end{aligned}$$

Diperoleh:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\mu_0\omega\sigma}}, \text{ dimana } \sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\delta = \frac{\sqrt{2\rho}}{\sqrt{\mu_0\omega}}, \text{ dimana } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \text{ dan } \omega = 2\pi f \text{ atau } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\delta = \frac{\sqrt{2\rho}}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \cdot 2\pi f}}$$

$$\delta = \frac{\sqrt{2\rho T}}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7}}}$$



$$\frac{\sqrt{\rho T}}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7}}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2} \frac{\sqrt{\rho T}}{\sqrt{10^{-1} \times 10^{-6}}}}$$

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho T 10^1 \times 10^6} \text{ m}$$

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho T 10} \text{ m dengan } \pi = 3,14$$

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\rho T 10} \text{ km}$$

$$\delta = \frac{1}{6,28} \sqrt{10} \sqrt{\rho T} \text{ km}$$

$$\delta = 0,159235669 \times 3.16227660 \sqrt{\rho T} \text{ km}$$

$$\delta = 0,503547 \sqrt{\rho T} \text{ km}$$

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ meter}$$



LAMPIRAN 4

CARA MENDAPATKAN BILANGAN GELOMBANG

$$\nabla^2 E = \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})}{\partial z^2} = \mu_0 \sigma \frac{\partial (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})}{\partial t} + \frac{\partial^2 (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})}{\partial t^2}$$

$$-ik \frac{\partial (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})}{\partial z} = i\omega \mu_0 \sigma (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t}) + i\omega \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})}{\partial t}$$

$$k^2 E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t} = i\omega \mu_0 \sigma (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t}) + i\omega \mu_0 \varepsilon_0 (-\omega^2) (E_0 e^{-ikz} e^{i\omega t})$$

$$k^2 E = i\omega \mu_0 \sigma E \pm \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 E$$

$$k^2 E = (i\omega \mu_0 \sigma \pm \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2) E$$

$$k^2 = (i\omega \mu_0 \sigma \pm \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2)$$

Dimana: $\mu_0 \sigma > \mu_0 \varepsilon_0$, maka:

$$k^2 = i\omega \mu_0 \sigma$$

$$k = \sqrt{i\omega \mu_0 \sigma}$$

