

IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN DATA MT (MAGNETOTELLURIC): STUDI KASUS DI DAERAH SAN LUIS VALLEY, COLORADO, USA

Gita Rusmala^a, Syamsurijal Rasimeng^b, Andri Yadi Paembonan^c

^a Institut Teknologi Sumatera

^b Universitas Lampung

^c Institut Teknologi Sumatera

*E-mail: gitarusmala@gmail.com

Abstract: *Research has been carried out using the Magnetotelluric method in the San Luis Valley area, Colorado, USA. This study aims to identify subsurface geological structures based on resistivity anomalies. The data used is secondary data with a total of 19 measurement points and divided into 5 lines, then inversion modeling of each profile is done using Winglink software to get 2D resistivity cross section, then 3D visualization is performed on the Geosoft Oasis Montaj software. The results obtained from the 2D cross section of the structure were identified as normal fault, horst-graben, and half-graben which have a high resistivity value of more than 351 ohm.m. It is assumed to be a basalt rock associated with andesite, tuff and breccia. In 3D visualization the results obtained in the form of three layers resistivity distribution, the first layer resistivity value of less than 28 ohm.m in blue is interpreted as mostly clay rock, the second layer of resistivity value of 28-351 ohm.m in green is interpreted as mostly sand and clay rock, the third layer of resistivity value of more than 351 ohm.m yellow to red is interpreted as an Oligocene age Precambrian bedrock, having basaltic lithology associated with andesite, tuff and breccia.*

Keywords: Magnetotelluric, Geologic structure, inversion modeling, 3D visualization.

Abstrak: Telah dilakukan penelitian dengan menggunakan metode Magnetotellurik di daerah San Luis Valley, Colorado, USA. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan anomali resistivitas. Data yang digunakan merupakan data sekunder dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 19 titik yang dibagi menjadi 5 lintasan, kemudian dilakukan pemodelan inversi setiap profil dengan menggunakan software Winglink untuk mendapatkan penampang resistivitas 2D, selanjutnya dilakukan visualisasi 3D pada software Geosoft Oasis Montaj. Hasil yang diperoleh dari penampang inversi 2D diidentifikasi struktur berupa normal fault, horst-graben, dan half-graben yang memiliki nilai resistivitas tinggi yaitu lebih dari 351 ohm.m diduga sebagai batuan basal yang berasosiasi dengan andesit, tufa dan breksi. Pada visualisasi 3D hasil yang didapat berupa sebaran resistivitas 3 lapis, lapisan pertama nilai resistivitas kurang dari 28 ohm.m berwarna biru diinterpretasikan sebagai batuan mostly clay, lapisan kedua nilai resistivitas sebesar 28-351 ohm.m berwarna hijau diinterpretasikan sebagai batuan mostly sand dan clay, lapisan ketiga nilai resistivitas lebih dari 351 ohm.m berwarna kuning hingga merah diinterpretasikan sebagai batuan dasar precambrian berumur oligosen, memiliki litologi batuan basal yang berasosiasi dengan andesit, tufa dan breksi.

Kata Kunci : Magnetotellurik, Struktur geologi, Pemodelan inversi, Visualisasi 3D

Pendahuluan

Struktur bawah permukaan (struktur geologi) adalah suatu kondisi geologi yang ada di suatu daerah sebagai akibat terjadinya perubahan-perubahan pada batuan oleh proses tektonik. Terjadinya proses tektonik menyebabkan batuan maupun kerak bumi akan berubah susunannya dari keadaan semula. Keberadaan struktur ini dapat memiliki berbagai potensi yaitu Sumber daya alam dan bencana alam. Potensi bencana tersebut dapat memberikan kerugian bagi pihak-pihak tertentu, baik kerugian berupa material ataupun non material. Oleh sebab itu, perlu adanya suatu studi untuk mengetahui struktur geologi bawah permukaan sehingga nantinya

dapat menghasilkan suatu kajian yang komprehensif untuk mempelajari struktur-struktur yang dipengaruhi oleh proses tektonik, guna meminimalisir terjadinya kerugian yang memungkinkan [1].

Salah satu studi yang digunakan untuk mengetahui struktur geologi bawah permukaan adalah dengan memanfaatkan survei geofisika yaitu metode magnetotellurik. Metode magnetotellurik merupakan salah satu metode elektromagnetik domain frekuensi yang memanfaatkan variasi alami medan elektromagnetik sebagai sumbernya [2]. Medan elektromagnetik yang digunakan berasal dari interaksi antara solar wind dengan magnetosfer bumi sehingga mengakibatkan ionosfer mengalami

fluktuasi medan elektromagnetik dan kemudian menginduksi bumi, spektrum frekuensi terekam sangat lebar yaitu 10-5 – 104 Hz [3]. Frekuensi yang lebar tersebut dapat mengatasi masalah overburden yang konduktif dan memiliki penetrasi kedalaman yang besar [4]. Dengan karakteristik tersebut, metode ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan bumi.

San Luis Valley merupakan lembah terbesar di Amerika Utara, lembah ini dipengaruhi oleh pegunungan San Juan di bagian barat dan pegunungan Sangre De Cristo di bagian timur. Secara geologis terdapat struktur geologi yang kompleks di bawah permukaan San Luis Valley [5]. Lantai dasar San Luis Valley terdiri dari serangkaian patahan yang kompleks, terakumulasi dalam struktur normal *fault*, *horst* dan *graben* [6]. Struktur umum cekungan diduga sebagai *half graben* terdapat di antara gunung San Juan dan Sangre De Cristo [6].

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan di daerah San Luis Valley belum ada penelitian menggunakan metode magnetotellurik untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan dan melakukan pemodelan inversi 2D dan visualisasi 3D.

Metode

Metode magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan teknik pencitraan bawah permukaan tanah yang digunakan untuk mengetahui struktur tahanan jenis (resistivitas) dari bawah permukaan bumi. Metode ini tergolong metode pasif dengan memanfaatkan sumber alami berupa medan listrik dan medan magnet yang berubah terhadap waktu. Terdapat dua sumber utama sinyal EM alami yang digunakan terkait dengan eksplorasi MT. Pertama frekuensi lebih dari 1 Hz, medan EM alami utama ini dapat dihasilkan oleh aktivitas petir, sumber ini merambat melalui ionosfer. Kedua, sinyal di bawah 1 Hz datang dari fluktuasi medan magnet bumi, yang disebabkan oleh perubahan dalam magnetosfer. Magnetosfer itu sendiri merupakan zona kompleks plasma yang secara simultan diterpa oleh *solar wind* [1]. Sifat-sifat perambatan gelombang EM didasarkan pada persamaan Maxwell sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

Dengan $\vec{E}$ (Volt/m) medan listrik, $\vec{D}$ (C/m²) perpindahan listrik, $\vec{H}$ (A/m) medan magnet, $\vec{B}$ (wb/m²) induksi magnetik, $\vec{j}$ (A/m²) rapat arus dan ρ Muatan total.

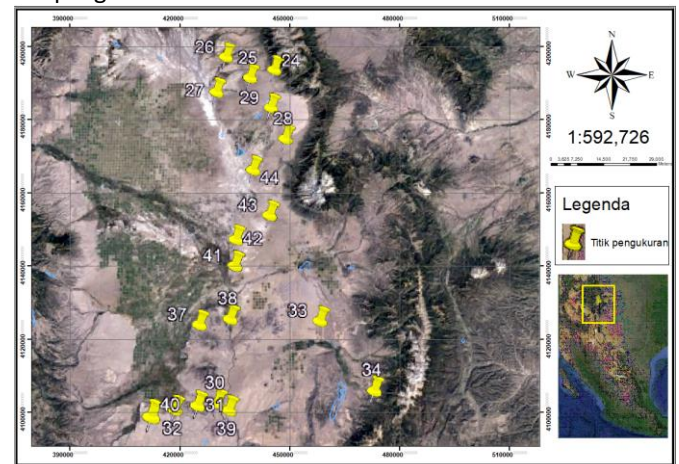
Kemudian terdapat suatu besaran fisis yang sering digunakan untuk menjelaskan proses penetrasi difusi gelombang elektromagnetik pada suatu material yang dikenal sebagai skin depth. Besaran skin depth didefinisikan sebagai suatu nilai kedalaman, ketika suatu gelombang elektromagnetik telah teratenuasi menjadi 1/e dari nilai semula (nilai di permukaan bumi) [7].

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5)$$

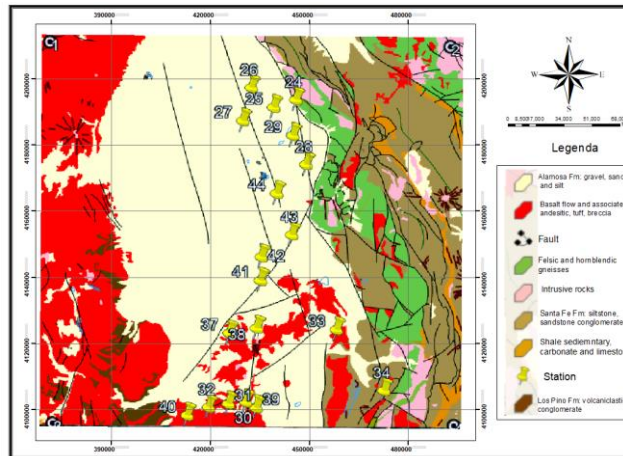
Dengan ρ adalah tahanan jenis dan f adalah frekuensi.

Data

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang terdiri dari data geofisika dan data geologi. Data geofisika yang digunakan adalah data magnetotellurik *sounding* dengan format .edi. Berada di daerah San Luis Valley, Colorado, USA. memiliki 19 titik pengukuran. Berikut persebaran titik pengukuran MT dilapangan:



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian dan titik pengukuran. Sedangkan data geologi menggunakan peta geologi sebagai berikut

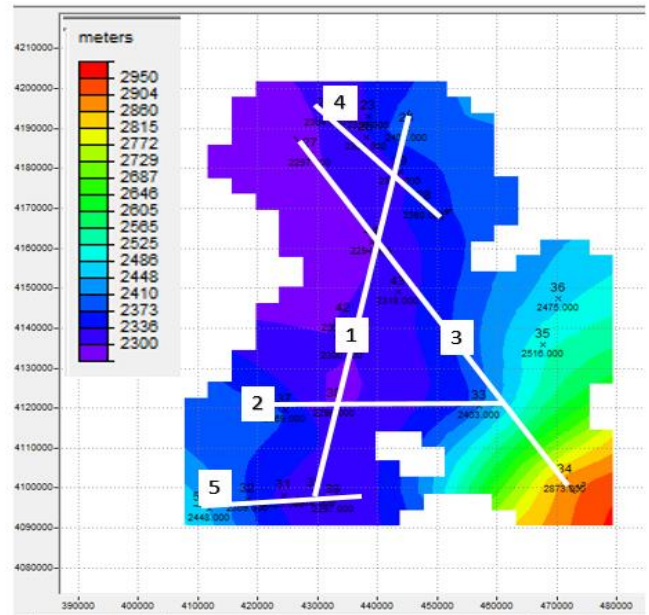


Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian.

Berdasarkan peta geologi San Luis Valley dibagi menjadi 4 formasi yaitu, formasi Blanco terdiri dari abu oligosen dan aliran lava, formasi Santa Fe terdiri dari campuran aluvium dan aliran lava dari vulkanik San Juan, formasi Los Pino merupakan aliran volkanoklastik konglomerat dan terakhir formasi Alamosa yang terdiri dari lapisan tipis kerikil berganti dengan pasir, *clay* dan *silt* hingga ketebalan sekitar 1165 feet (355 m). Formasi Alamosa dilewati oleh *sand dunes*, *alluvial fan*, *stream channels*, *floodplain* alluvium dan *lake sediments* [8].

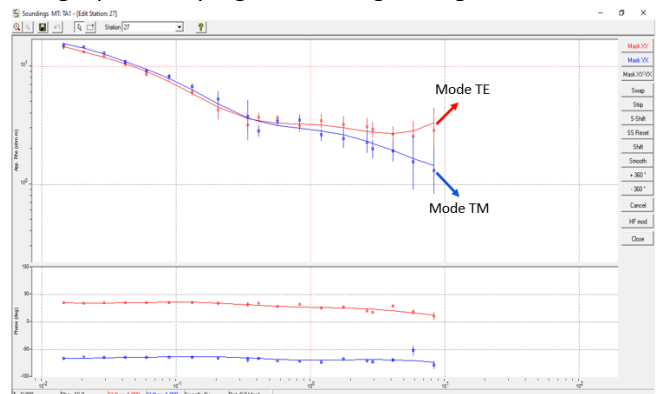
Pengolahan Data

Pengolahan data magnetotellurik pada penelitian ini menggunakan 2 perangkat lunak yaitu Winglink dan Geosoft Oasis Montaj. Data sekunder dalam format .edi dimasukkan kedalam *software* Winglink, kemudian dilakukan pendefinisian lintasan, Pendefinisian ini digunakan untuk menentukan stasiun mana saja yang masuk ke dalam lintasan tersebut.



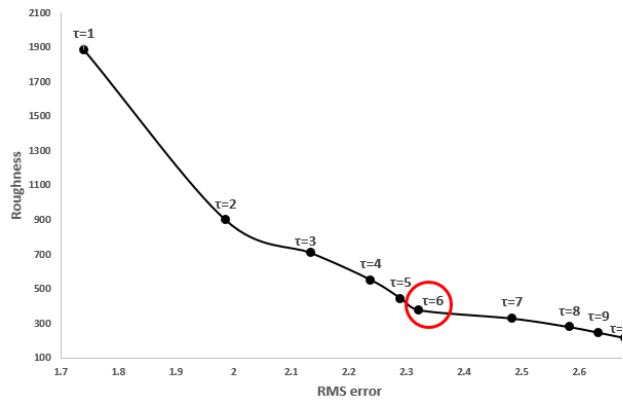
Gambar 3 lintasan topografi MT dengan menggunakan Winglink.

selanjutnya dilakukan *smoothing* dengan cara menyesuaikan garis kalkulasi dan titik data, sehingga hasil kurva yang didapat mendekati data frekuensi setiap titik data. setelah proses *smoothing* dilakukan proses *masking*, proses ini dilakukan untuk menghapus data yang dirasa mengandung *noise*.



Gambar 4. Kurva resistivitas hasil *smoothing* dan *masking*.

kemudian dilakukan analisis nilai parameter tau parameter tau merupakan parameter yang menjelaskan hubungan nilai RMS error dengan *roughness* (tingkat kekasaran) pada hasil inversi.



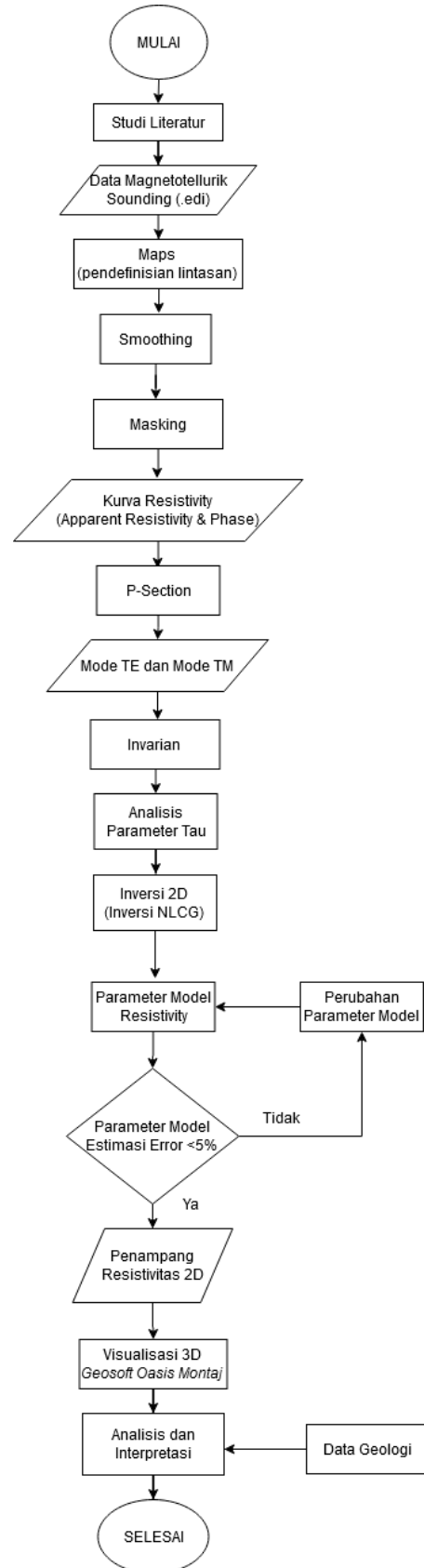
Gambar 5 plot parameter tau

Dalam penelitian dilakukan plot nilai *roughness* terhadap RMS error pada beberapa nilai tau. Pada penelitian ini dipilih nilai tau yang menghasilkan kombinasi nilai RMS error dan *roughness* yang rendah, sehingga model hasil inversi relatif tidak terlalu kasar. Dalam penelitian ini digunakan nilai tau sebesar 6.

Setelah itu dilakukan inversi 2D untuk mendapatkan penampang resistivitas, pemodelan inversi pada *software* Winglink menggunakan metode inversi NLCG (*Nonlinear Conjugate Gradien*). Metode ini mampu memperkecil suatu fungsi objektif yang didefinisikan sebagai berikut:

$$U(\mathbf{m}, \lambda) = \lambda^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}])\mathbf{C}_d^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}]) - \mathbf{X}^{-2} + (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \quad (6)$$

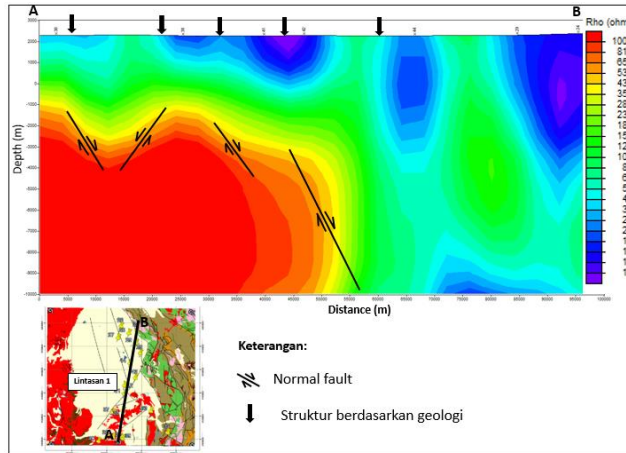
Di mana $\mathbf{m}$ adalah model resistiviti dalam dimensi M , $\mathbf{m}_0$ adalah prior model, $\mathbf{C}_m$ adalah model *matrix covariance*, $\mathbf{d}$ adalah data observasi dengan dimensi N , $\mathbf{F}[\mathbf{m}]$ adalah *forward* model response, $\mathbf{C}_d$ adalah data *matrix covariance*, $\mathbf{X}^{-2}$ adalah misfit yang dicari, λ^{-1} adalah faktor pengali Lagrange.



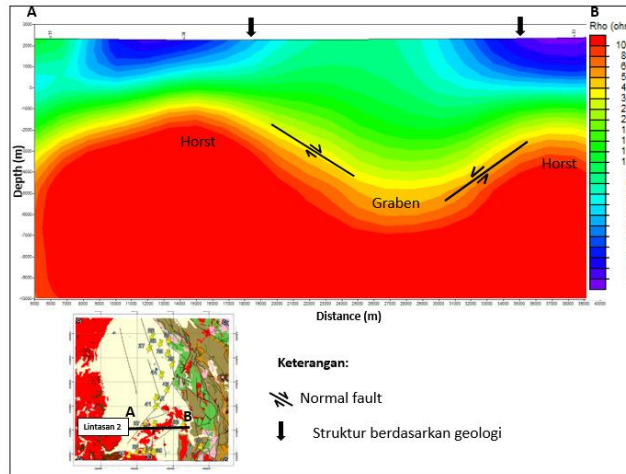
Gambar 6. Diagram alir penelitian.

Hasil dan Pembahasan

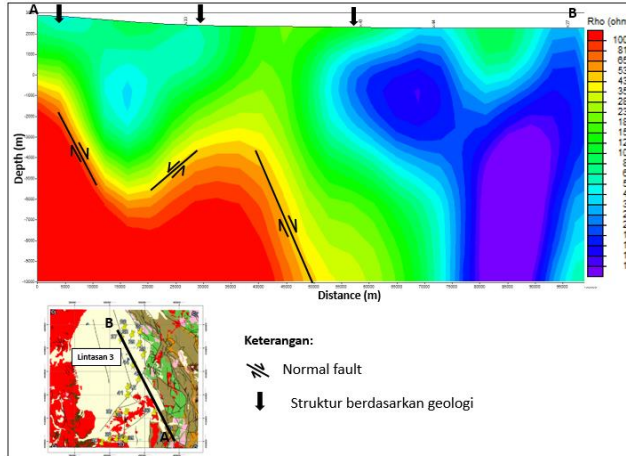
Hasil inversi 2D



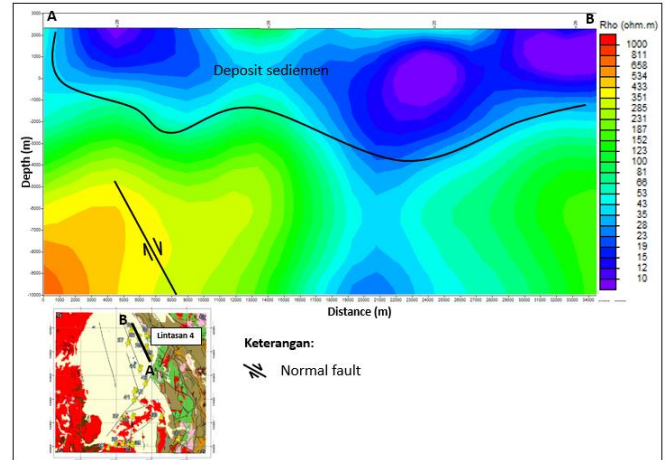
Gambar 7. Hasil inversi 2D lintasan 1.



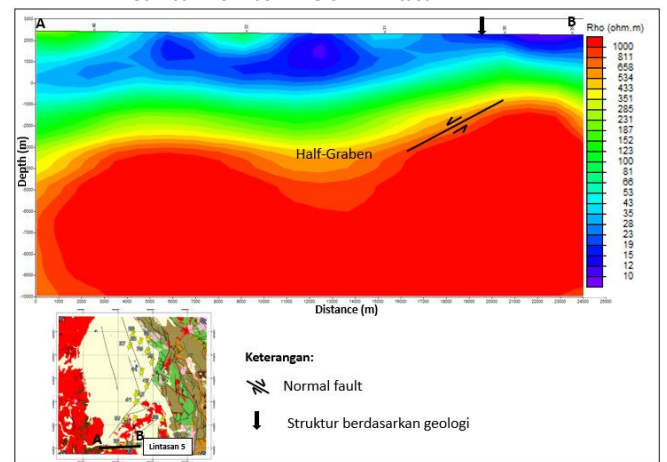
Gambar 8. Hasil inversi 2D lintasan 2.



Gambar 9. Hasil inversi 2D lintasan 3.



Gambar 10. Hasil inversi 2D lintasan 4.



Gambar 11. Hasil inversi 2D lintasan 5.

Gambar di atas merupakan hasil pemodelan inversi 2D dengan RMS error rata-rata sebesar 2,26. Data magnetotellurik pada lintasan 1 terdiri dari 7 titik *sounding* berarah Selatan-Utara, lintasan 2 terdiri dari 3 titik *sounding* berarah Timur-Barat, lintasan 3 terdiri dari 3 titik *sounding* berarah Tenggara-Barat, lintasan 4 terdiri dari 4 titik *sounding* berarah Tenggara-Barat Laut, dan lintasan 5 terdiri dari 5 titik *sounding* berarah Timur-Barat. Pada hasil inversi 2D ini memiliki kedalaman 10.000 meter dan ketinggian 2.000 meter.

Pada hasil inversi 2D yang terlihat pada gambar di atas, menghasilkan sebaran resistivitas pada penampang berkisar dari rentang 1-1000 ohm.m, dimana terdapat resistivitas yang rendah ditandai dengan warna ungu hingga biru bernilai kurang dari 28 ohm.m, resistivitas menengah yang ditandai dengan warna hijau-kuning bernilai 28 – 351 ohm.m dan resistivitas tinggi yang ditandai warna jingga-merah bernilai lebih dari 351 ohm.m. Berdasarkan data geologi dan rentang nilai resistivitas yang tinggi dapat diinterpretasikan bahwa pada zona

struktur ini memiliki litologi berupa basal yang berasosiasi dengan batuan andesit, tufa dan breksi.

Pada penampang resistivitas lintasan 1, dapat dilihat bahwa pada kedalaman 1000 meter di bawah permukaan lapisan resistivitas tinggi diidentifikasi sebagai struktur geologi berupa normal *fault*. Terdapat 4 struktur normal *fault* yang terlihat pada penampang, 2 struktur normal *fault* memiliki arah yang berlawanan, dan 2 struktur yang lain memiliki arah yang sama.

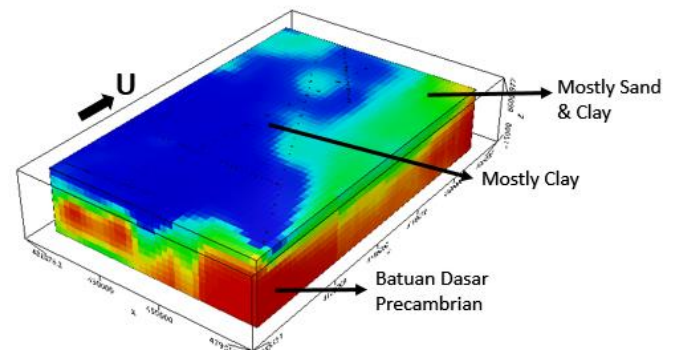
Pada penampang resistivitas lintasan 2 dapat dilihat bahwa pada kedalaman 1000 meter di bawah permukaan lapisan resistivitas tinggi diidentifikasi sebagai struktur normal *fault*. Struktur normal *fault* ini memiliki struktur yang berpasangan dengan bidang patahan yang berlawanan, dimana blok-blok yang turun akan membentuk *graben* dan blok-blok yang terangkat akan membentuk *horst*.

Pada penampang resistivitas lintasan 3 dapat dilihat bahwa pada kedalaman -1000 meter di bawah permukaan lapisan resistivitas tinggi diidentifikasi sebagai struktur normal *fault*, dari 3 struktur yang terlihat pada penampang terdapat 2 struktur yang berlawanan dan berpasangan.

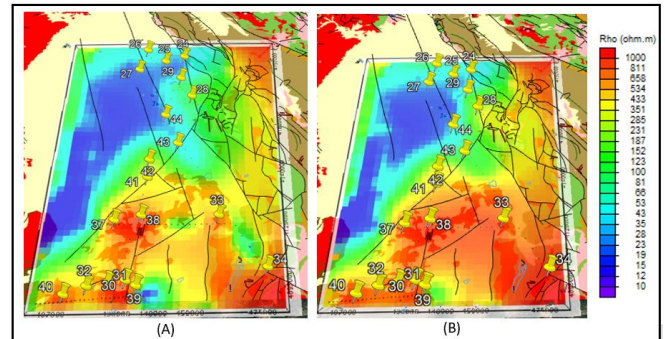
Pada penampang resistivitas lintasan 4 dapat dilihat bahwa pada kedalaman 5000 meter di bawah permukaan terdapat struktur normal *fault*, struktur ini dipengaruhi oleh aktifitas gempa kecil yang sering terjadi pada kedalaman 5000 meter, berdasarkan data geologi dan rentang nilai resistivitas yang tinggi dapat diinterpretasikan bahwa pada zona struktur ini memiliki litologi berupa basal yang berasosiasi dengan batuan andesit, tufa dan breksi. Selain itu, diatas permukaan hingga kedalaman 4000 meter terdapat lapisan resistivitas rendah yaitu kurang dari 28 ohm.m diidentifikasi sebagai zona deposit sedimen dengan batuan sumber yang berasal dari pegunungan San Juan dan Sangre de Cristo. Berdasarkan data geologi dan rentang nilai resistivitas yang rendah dapat diinterpretasikan bahwa pada zona ini memiliki litologi berupa batuan mostly clay.

Pada penampang resistivitas lintasan 5 dapat dilihat bahwa pada kedalaman 1000 meter di bawah permukaan lapisan resistivitas tinggi diidentifikasi sebagai struktur normal *fault*. Struktur normal *fault* ini diduga memiliki bidang patahan yang berbentuk lengkungan dengan kemiringan yang semakin berkurang ke arah bagian bawah sehingga blok yang turun dapat mengalami rotasi, sehingga struktur yang melengkung tersebut diidentifikasi sebagai *half-graben*.

Visualisasi 3D



Gambar 12. Visualisasi 3D dari 5 lintasan.



Gambar 13. Persebaran resistivitas di lihat pada kedalaman -1000 dan -5000.

Hasil visualisasi 3D (Gambar 12) memperlihatkan keberadaan model bawah permukaan San Luis Valley dengan persebaran resistivitas yang dibagi menjadi tiga lapisan, lapisan pertama nilai resistivitas kurang dari 28 ohm.m berwarna biru diinterpretasikan sebagai batuan mostly clay, lapisan kedua nilai resistivitas sebesar 28-351 ohm.m berwarna hijau diinterpretasikan sebagai batuan mostly sand dan clay, lapisan ketiga nilai resistivitas lebih dari 351 berwarna kuning hingga merah diinterpretasikan sebagai batuan dasar precambrian berumur oligosen, memiliki litologi batuan basal yang berasosiasi dengan andesit, tufa dan breksi.

Persebaran resistivitas (gambar 13) dengan kedalaman 1000 meter dan 5000 meter di bawah permukaan. Pada bagian Utara terdapat nilai anomali yang rendah yaitu kurang dari 28 ohm.m, hal ini disebabkan karena daerah tersebut terdapat cekungan Alamosa dan mencakup semua cekungan yang dialiri air serta *alluvial fan* sehingga resistivitas di daerah tersebut cenderung rendah. Kemudian pada bagian Selatan terdapat nilai resistivitas yang tinggi yaitu lebih dari 351 ohm.m, hal ini disebabkan karena pada daerah tersebut memiliki litologi batuan beku dan berasosiasi dengan batuan dasar Precambrian.

Dari semua hasil yang telah diuraikan, struktur yang berkembang pada San Luis Valley merupakan hasil dari aktivitas lempeng tektonik. Lempeng tektonik yang berperan dalam pembentukan struktur ini disebabkan karna kerak benua yang mengalami pemekara dan menipis sehingga membentuk sebuah cekungan sedimen, atau biasa disebut dengan rifting. Rifting yang berperan dalam pembentukan San Luis Valley merupakan hasil dari patahan Rio Grand Rift yang memanjang dari Selatan Colorado melalui New Mexico, Texas dan Meksiko Utara. Struktur ini mulai terbentuk sekitar 28 juta tahun yang lalu pada Zaman Oligosen ketika sebuah struktur graben yang besar mulai tenggelam di sepanjang patahan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diperoleh, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penampang inversi 2D memperlihatkan kontras resistivitas yang diidentifikasi sebagai struktur geologi berupa normal *fault*, graben, horst dan half-graben yang ditandai dengan warna merah memiliki resistivitas lebih dari 351 ohm.m diduga sebagai batuan basalt yang berasosiasi dengan tufa, breksi dan konglomerat.
2. Berdasarkan sebaran resistivitas visualisasi 3D terdapat 3 lapisan. lapisan pertama nilai resistivitas kurang dari 28 ohm.m berwarna biru diinterpretasikan sebagai batuan mostly clay, lapisan kedua nilai resistivitas sebesar 28-351 ohm.m berwarna hijau diinterpretasikan sebagai batuan mostly sand dan clay, lapisan ketiga nilai resistivitas kurang dari 351 berwarna kuning hingga merah diinterpretasikan sebagai batuan dasar precambrian, memiliki litologi batuan basalt yang berasosiasi dengan andesit, tufa dan breksi.

Saran

Dari hasil keseluruhan penelitian ini penulis memiliki saran yang mungkin berguna untuk langkah kedepannya, saran yang dapat penulis sampaikan yaitu Pengolahan lanjutan dengan melakukan korelasi menggunakan metode *microearthquake*, karena dengan metode tersebut diharapkan dapat diketahui daerah patahan kecil yang lebih kompleks.

References

- [1] R.A. Nugroho, "Analisis Pengaruh Rotasi Impedansi Data Magnetotellurik Terhadap Hasil Pemodelan 2 Dimensi Pada Model Patahan (Sesar)," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2018.
- [2] H. Grandis, "Metode Magnetotellurik (MT)," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2013.
- [3] K. Vozoff, "The Magnetotelluric method, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Application, Geophysics," SEG Publishing, 1991, Vol. 2.
- [4] Y. Daud, "Electromagnetic Methode: Success Story in Geothermal Exploration and Possibility for Hydrocarbon Exploration," FMIPA: Universitas Indonesia, 2010,.
- [5] V. Alstine, R. Erskine, "Geologic Map of the Bonanza NE Quadrangle, Chaffee and Saguache Counties. Colorado U.S.," Geological Open-File Report, 1975, No.75-53.
- [6] C.F. Kluth, C.F. Schaftenaar, "Depth and geometry of the northern Rio Grande rift in the San Luis basin, south-central Colorado. In: Keller, G.R., Cather, S.M. (Eds.), Basins of the Rio Grande Rift: Structure, Stratigraphy, and Tectonic Setting," Geol. Soc. Am. Spec, 1994, Jurnal. 291, No.27-37.
- [7] Unsworth, "Lecture Notes. Geophysic," 2008, No.424.
- [8] H. Grandis, "Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika," Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, Jakarta, 2009.
- [9] F. Simpson dan K. Bahar, "Practical Magnetotelluric," Cambridge University Press, 2005.
- [10] J.F. Hermance, "Processing of Magnetotelluric Data," Departmen of Geological Sciences, Brown University: USA, 1973.
- [11] D.M Heditama, "Pemrosesan Data Time Series Pada Metode Magnetotellurik (MT) Menjadi Data Resistivitas Semu Dan Fase Menggunakan Matlab," FMIPA: Universitas Indonesia, 2011.
- [12] L. Cagniard, "Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting," Geophysics 18, 1953.

- [13] Goldberg dan Rotstein, "A Simple Form of Presentation of Magnetotelluric Data Using the Bostick Transform," Vol. 30. Geophysical Prospecting Publishing, 1982,
- [14] Q. Amriyah, "Pemodelan Data Magnetotellurik Multidimensi Untuk Mendelineasi Sistem Geotermal Daerah Tawau, Malaysia," FMIPA: Universitas Indonesia, 2012.
- [15] M. Yuven, "Materi Kuliah Teknik Pertambangan," STTNAS: Yogyakarta, 2016.
- [16] J.E. Upson. "Physiographic Subdivision of San Luis Valley, South Colorado," Journal of Geology 47, 1939.
- [17] G.N. Green, "The Digital Geologic Map of Colorado in ARC/INFO Format: U.S.," Geological Survey Open-File Report 92-0507, 1992. <http://pubs.usgs.gov/of/1992/ofr-92-0507/>.
- [18] J.P. McCalpin, "General Geology of the Northern San Luis Valley, Colorado," report prepared by GEO-HAZ Consulting, 1996.
- [19] B.S. Brister dan R.R. Gries, "Tertiary Stratigraphy and Tectonic Development of the Alamosa Basin (North San Luis Valley), Rio Grand Rift, South-Central Colorado, in Keller, G.R. and Cather, S.M. (eds.), Basin of the Rio Grande Rift: Structure, Stratigraphy, and Tectonic Setting," Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 291, 1994, No. 39-58
- [20] Great sand dunes, national park and preserve, "Geologi cross section San Luis Valley," 2015. https://www.handsontheland.org/grsa/resources/geo_cross_section.htm
- [21] Unsworth, "Overview of Electromagnetic Exploration Methods," University of Alberta, 2006.
- [22] J. P. McCalpin, "Quaternary Geology and of the Northern Sangre De Cristo Mountains, South-Central Colorado," Colorado School of Mines Quarterly, 1983.
- [23] E.Z. Gaffar, "Struktur Geologi Bawah Permukaan di Garut Selatan Berdasarkan Data Elektromagnetik," Vol.27, RISET: Geologi dan Pertambangan, 2017, no.2
- [24] J. S. Grauch, P. A. Bedrosian, dan B. J. Drenth, "Advancements in understanding the aeromagnetic expressions of basin-margin faults—An example from San Luis Basin, Colorado," SEG Publishing, 2013.
- [25] A. B. Mashuda, "Pendugaan Struktur Bawah Permukaan Zona Semburan Lumpur Sidoarjo "LUSI" Berdasarkan Data Magnetotellurik," Seminar Nasional Fisika: UNESA, 2017.
- [26] O. J. Anderson dan G. E. Jones, "Geologic Map of New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources," Open-File Report 408-A and B, geologic map and 15 Magnetic disks, scale 1:500.000, 1994.
- [27] J. P. McCalpin, "Assessment of Faulting at the Proposed New Landfill Site for Rio Grande County, Colorado," report prepared by GEO-HAZ Consulting for the Rio Grande County Commissioners, 1992.
- [28] B. S. Brister dan W. C. McIntosh, "Identification and correlation of Oligocene ignimbrites in well bores, Alamosa Basin (northern San Luis Basin), Colorado, by single-crystal laser-fusion $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of well cuttings," in S. M. Cather, W. C. McIntosh, dan S. A. Kelley, "Tectonics, geochronology, and volcanism in the Southern Rocky Mountains and Rio Grande rift," New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources Bulletin 160, 281–296, 2004.
- [29] F. Nuraini, "Analisis Resistivitas Terhadap Pengaruh Mode Pada Pengolahan Data Magnetotellurik," FMIPA, Studi Geofisika: Universitas Hasanuddin, 2017.
- [30] Fundamental, physical properti dan MT https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/index.html
- [31] B. D. Rodriguez, Magnetotelluric sounding locations, stations 23 to 46, San Luis Valley, Colorado, 2007: U.S. Geological Survey data release, 2017. <https://doi.org/10.5066/F77942VF>