

Identifikasi Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Pemodelan 2D Anomali Magnetik

Wenti Marlensi Maubana¹, Yanti Boimau²

Program Studi Fisika, Universitas San Pedro, Kupang, Indonesia

Email korespondensi: wentimmaubana@gmail.com

Abstrak

Penelitian mengenai identifikasi reservoir panas bumi telah dilakukan di kompleks gunung Pandan Jawa Timur menggunakan metode magnetik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keberadaan dan kedalaman reservoir panas bumi berdasarkan nilai anomali magnetik. Akuisisi data magnetik dilakukan sebanyak 80 titik dengan luasan daerah penelitian $9 \times 10 \text{ km}^2$. Pengolahan data meliputi koreksi diurnal, koreksi IGRF (*International Geomagnetik Reference Field*), dan kontinuasi ke atas. Berdasarkan hasil pengolahan data magnetik, diperoleh rentang nilai anomali magnetik $-446,7 \text{ nT}$ sampai $526,3 \text{ nT}$. Interpretasi kualitatif data magnetik dilakukan pada hasil anomali magnetik yang telah dikoreksi meliputi koreksi harian, koreksi IGRF, dan kontinuasi ke atas. Interpretasi kuantitatif data magnetik dilakukan dengan membuat model 2D menggunakan peta anomali magnetik residual. Hasil pemodelan 2D menunjukkan bahwa terdapat beberapa struktur sekunder berupa rekahan/crack yang menjadi jalan keluarnya fluida panas menuju ke permukaan. Reservoir hidrotermal manifestasi Jari (Selo Gajah) diduga berada pada batupasir tufaan dengan kedalaman $500 \text{ m} - 1500 \text{ m}$, sedangkan manifestasi Banyukuning diperkirakan berada pada breksi vulkanik dengan kedalaman $1000 \text{ m} - 1500 \text{ m}$.

Masuk:

30 Agustus 2023

Diterima:

01 Oktober 2023

Diterbitkan:

03 Oktober 2023

Kata kunci:

Anomali Magnetik, Geotermal, Gunung Pandan, Manifestasi Jari, Manifestasi Banyukuning

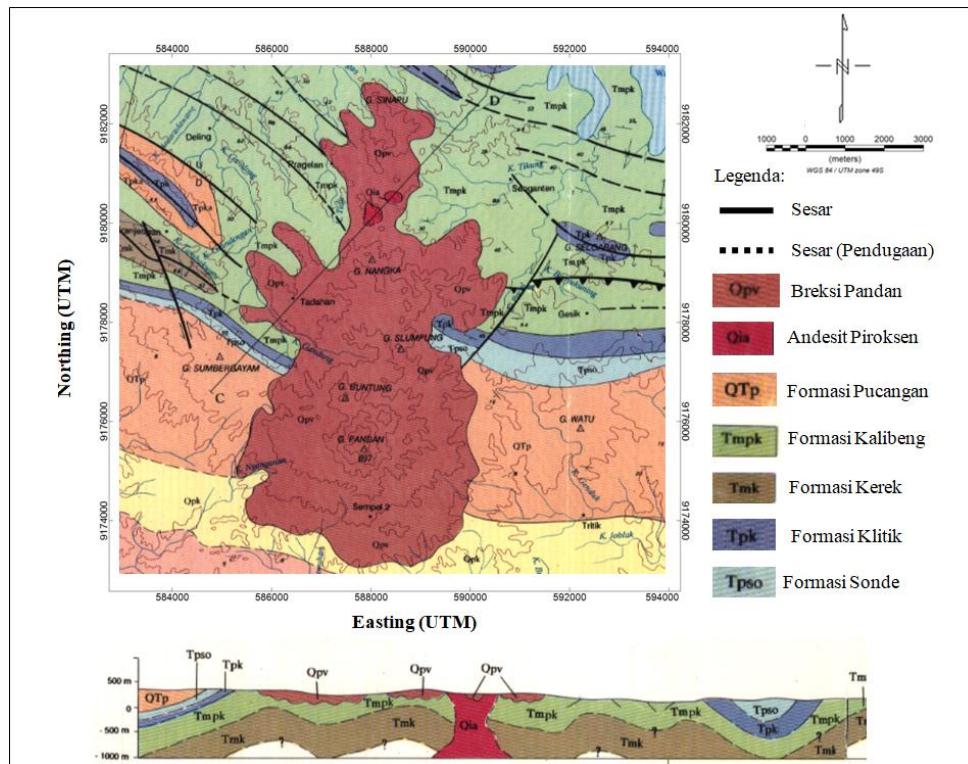
1. Pendahuluan

Panas bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan serta sebagai salah satu sumber daya alam yang dapat diperbaharui. Sumber energi panas bumi ini terbentuk secara alami di bawah permukaan bumi [1]. Menurut data Ditjen EBTKE (2017), lapangan panas bumi yang diperkirakan memiliki potensi cukup besar berada di pulau Jawa dan salah satunya berada di kompleks gunung Pandan, Jawa Timur. Daerah ini diprediksi memiliki manifestasi energi panas bumi sekitar 60 MWe, hal ini dibuktikan dengan kemunculan mata air panas di beberapa lokasi dengan suhu lebih dari 35°C [2].

Gunung Pandan berada di bagian selatan Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur yang terletak di antara koordinat $588107.12 \text{ m E} - 9174952.00 \text{ m S}$. Berdasarkan peta geologi lembar Bojonegoro (Gambar 1) menunjukkan gunung Pandan dengan fisiografi daerah termasuk ke dalam lajur kendeng di bagian selatan yang terdiri atas perbukitan berbentuk kasar dengan lereng agak landai sampai curam, mencapai ketinggian antara $150 \text{ m} - 897 \text{ mdpl}$. Berdasarkan peta geologi, diketahui bahwa daerah penelitian didominasi oleh batuan hasil erupsi gunung api Pandan yaitu breksi gunung Pandan (Opv) batuan terobosan berupa andesit piroksen (Qia), formasi pucangan (QTp) meliputi breksi vulkanik, batu lempung dan batupasir. Formasi sonde (Tpso) terdiri dari tufan perselingan batu lempung, pasir dan batu gamping, formasi klitik (Tpk) berupa batu gamping klasik bersisipan napal dan batu lempung, formasi kalibeng (TmPk) berupa napal, setempat sisipan tuf, batupasir tufaan, kalkarenit. Formasi kerek (Tmk) terdiri dari perselingan batupasir, batu lempung, tuff napal dan batu gamping, dan formasi kabuh (Qpk) berupa konglomerat, batupasir, setempat bersisipan lempung dan napal [3].

Secara umum terdapat beberapa metode geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi reservoir panas bumi, salah satunya adalah metode magnetik. Metode ini sangat sensitif terhadap aktivitas termal. Metode magnetik diterapkan untuk mengukur variasi nilai intensitas medan magnet [4]. Variasi intensitas magnet disebabkan oleh sebaran batuan dan magnetisasi di bawah permukaan bumi yang dapat disebabkan oleh perubahan struktur geologi dan perbedaan jenis batuan di bawah permukaan bumi [5]. Kemampuan suatu batuan untuk menjadi magnet bergantung pada susceptibilitas magnetik masing-masing batuan. Batuan dengan kandungan mineral tertentu dapat diketahui sebagai anomali. Untuk tujuan geologis, anomali menjadi sasaran survei magnetik [6].

Berdasarkan penelitian sebelumnya [7], [8], [9] dan [10] metode ini terbukti handal dalam menganalisis reservoir panas bumi. Tujuan utama survei magnetik ini adalah untuk mengidentifikasi reservoir panas bumi yang meliputi keberadaan reservoir dan kedalaman reservoir panas bumi.



Gambar 1. Peta geologi lembar Bojonegoro

2. Metode Penelitian

Penelitian identifikasi reservoir panas bumi menggunakan metode magnetik telah dilakukan di kompleks gunung Pandan, Jawa Timur. Pengambilan data di lokasi penelitian menggunakan *Proton Precision Magnetometer* (PPM) dengan metode *looping*. Pengukuran dilakukan pada luasan daerah $\pm 9 \times 10 \text{ km}^2$. Pengambilan data sebanyak 80 titik dengan jarak antara titik adalah $\pm 1 \text{ km}$. Data yang diperoleh berupa *latitude*, *longitude*, elevasi, waktu, dan data intensitas medan magnet total.

2.1 Peralatan Penelitian

Alat dan bahan akuisisi data magnetik:

- Proton Precision Magnetometer* (PPM) Merk GEOMETRICS dengan seri G-856 dengan ketelitian 0,01 nT
- GPS* untuk penentuan lokasi pengambilan data dan ketinggian
- Pengukuran waktu (Jam)
- Peta geologi
- Kompas

2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang didapatkan saat pengukuran di lapangan. Data primer tersebut meliputi:

- Koordinat titik pengambilan data
- Waktu pengambilan data
- Ketinggian waktu pengambilan data
- Bacaan alat magnetometer berupa nilai anomali medan magnet bumi

2.3 Pengolahan Data Magnetik

Pengolahan data magnetik dilakukan dengan menggunakan hasil akuisisi data di lapangan. Parameter yang digunakan dalam pengolahan adalah nilai intensitas medan magnetik, posisi latitude, longitude, ketinggian dan waktu. Beberapa koreksi data yang diperlukan antara lain:

a. Koreksi Diurnal

Koreksi diurnal dilakukan dengan menggunakan persamaan (1). Jika nilai variasi harian bernilai positif maka koreksi diurnal dilakukan dengan mengurangi nilai variasi harian terhadap data intensitas medan magnet. Sebaliknya jika nilai variasi harian bernilai negatif maka koreksi diurnal dilakukan dengan menambahkan nilai variasi harian dan intensitas medan magnet [3].

$$H_D = \frac{t_n - t_{aw}}{t_{ak} - t_{aw}} (H_{ak} - H_{aw}) \quad (1)$$

Keterangan:

- t_n : Waktu pada titik n
- t_{ak} : Waktu pada titik akhir
- t_{aw} : Waktu pada titik awal
- H_{aw} : Nilai medan magnet pada titik akhir
- H_{ak} : Nilai medan magnet pada titik awal

b. Koreksi IGRF

Koreksi IGRF dilakukan dengan menggunakan kalkulasi dari NOAA yang diakses secara online. Parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai IGRF adalah posisi latitude dan longitude titik akuisisi pengukuran, elevasi, tanggal, bulan dan tahun pengukuran. Output yang diperoleh berupa nilai deklinasi, inklinasi, intensitas horizontal, medan magnetik pada komponen x, y, dan z serta nilai anomali medan magnetik total. Setelah didapatkan nilai dari koreksi IGRF, nilai anomali medan magnet dapat dihitung menggunakan perumusan berikut [3]:

$$\Delta H = H_n - (H_D + H_{IGRF}) \quad (2)$$

Keterangan:

- ΔH : Anomali medan magnet total
- H_n : Medan magnet terukur
- H_D : Koreksi harian
- H_{IGRF} : Koreksi IGRF

c. Kontinuasi ke Atas

Kontinuasi ke atas bertujuan untuk menghilangkan atau reduksi pengaruh anomali lokal yang masih terdapat pada data dan mencari pengaruh anomali residualnya. Pemisahan anomali residual dan anomali regional dilakukan menggunakan software Geosoft oasis montaj 8.4.

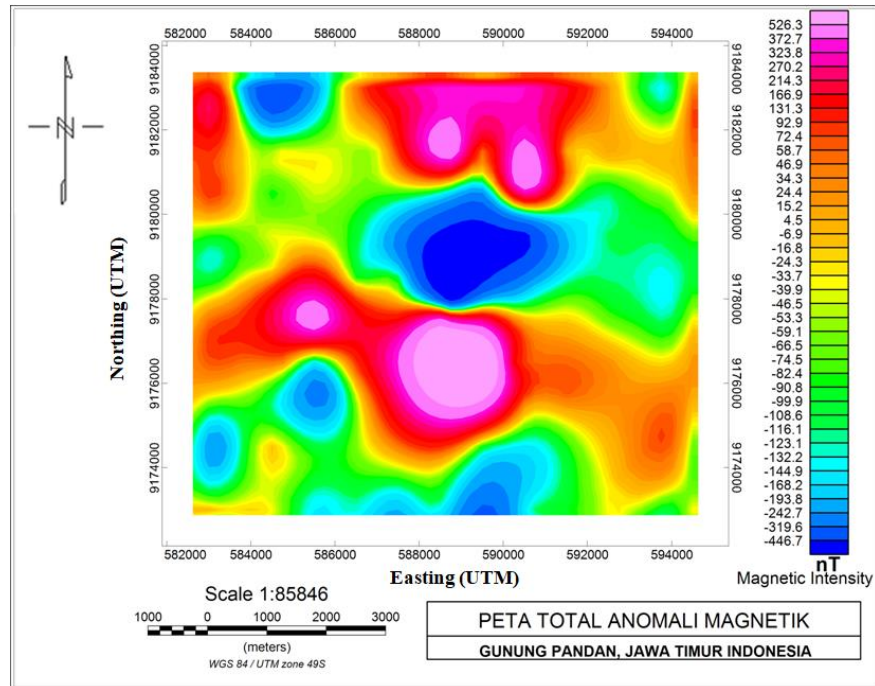
2.4 Interpretasi Data Magnetik

Interpretasi yang dilakukan adalah secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi kualitatif didasarkan pada pola kontur anomali medan magnetik yang bersumber dari distribusi benda-benda yang termagnetisasi atau bisa juga struktur geologi bawah permukaan bumi. Interpretasi ini dilakukan dengan melakukan analisa peta kontur anomali medan magnetik lokal dengan hasil yang diperoleh berupa lokasi penyebab anomali medan magnetik berdasarkan kontur. Interpretasi kuantitatif bertujuan untuk menentukan bentuk dan kedalaman benda anomali atau struktur geologi melalui pemodelan.

3. Hasil dan Pembahasan

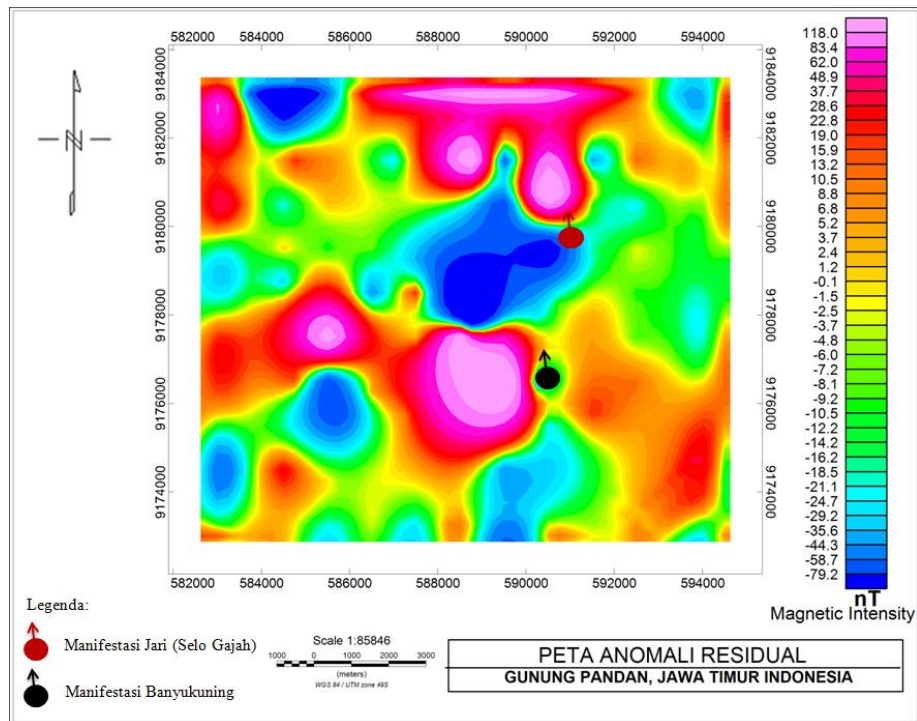
Gambar 2. menunjukkan bahwa distribusi nilai intensitas magnet total daerah penelitian berkisar antara -446,7 nT untuk nilai minimum sampai 526,3 nT untuk nilai maksimum. Perbedaan nilai intensitas magnetik total ini disebabkan oleh perbedaan kandungan mineral di bawah permukaan. Pola positif-negatif dan pola kontur agak rapat dapat diindikasikan bahwa daerah tersebut terdapat patahan/sesar. Pola sebaran nilai anomali medan magnetik total di daerah penelitian dikelompokkan menjadi tiga yaitu anomali rendah, anomali sedang dan anomali tinggi.

Anomali tinggi menyebar di bagian utara-selatan daerah penelitian yang ditunjukkan oleh warna orange gelap-ungu terang dengan rentang nilai 4,5 nT sampai 526,3 nT. Anomali magnetik sedang dan rendah terdapat pada bagian barat laut-timur laut dan selatan tenggara-barat daya daerah penelitian yang ditunjukkan oleh warna orange terang sampai biru gelap dengan rentang nilai sekitar -6,9 nT sampai -446,7 nT.



Gambar 2. Peta kontur anomali magnetik total daerah penelitian

Kontinuasi ke atas bertujuan untuk mendapatkan anomali magnetik regional dan anomali magnetik residual. Anomali magnet regional diduga disebabkan oleh struktur geologi yang luas dan dalam. Anomali residual menjelaskan sebaran struktur geologi bawah permukaan yang lebih jelas dan spesifik [5]. Pada penelitian ini digunakan anomali magnetik residual karena dianggap paling tepat untuk interpretasi anomali magnetik karena hasilnya dikorelasikan menggunakan koefisien korelasi. Peta kontur residual ditunjukkan pada Gambar 3.



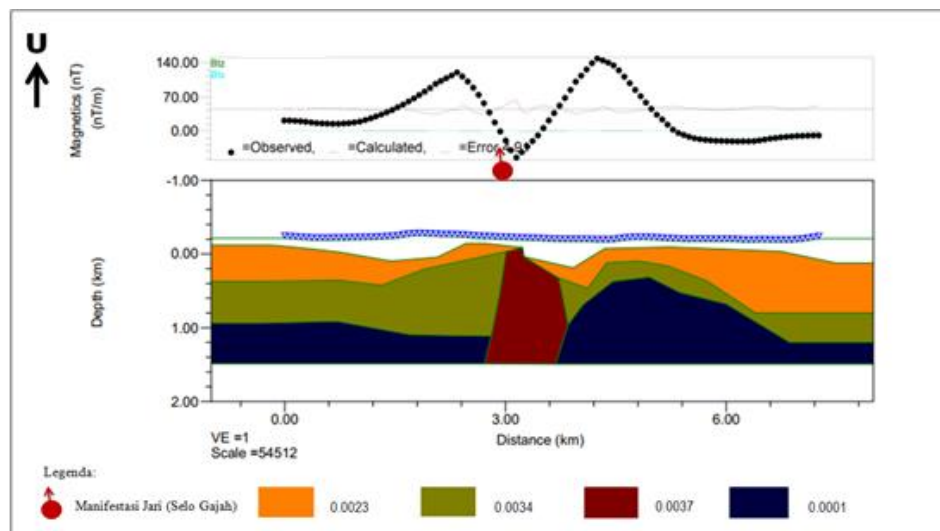
Gambar 3. Peta kontur anomali residual daerah penelitian

Berdasarkan peta anomali residual (Gambar 3) daerah dengan anomali tinggi berada pada bagian utara dan selatan daerah penelitian dengan rentang nilai 3,7 nT sampai 118,0 nT. Anomali sedang dan rendah memiliki persebaran pada bagian Barat Laut-Timur Laut dan Selatan Tenggara-Barat Daya daerah penelitian dengan rentang nilai 2,4 nT sampai -79,2 nT.

Penyelidikan sistem panas bumi dengan menggunakan metode magnetik didasarkan pada sifat kemagnetan batuan. Apabila suatu batuan berada di sekitar sumber panas maka batuan tersebut akan mengalami penurunan kemagnetan/demagnetisasi. Oleh karena itu, pada daerah yang terdapat sumber panas maka intensitas medan magnet batuannya akan lebih rendah dari sekitarnya [11]. Anomali magnetik tinggi mempunyai nilai suseptibilitas magnetik yang tinggi pula menunjukkan adanya keberadaan mineral-mineral magnetik yang terkandung pada batuan di bawah permukaan. Batuan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik tinggi diantaranya adalah batuan vulkanik berupa batuan beku yang proses pembentukannya berasal dari hasil pembekuan magma secara intrusif maupun ekstrusif. Anomali magnetik rendah mempunyai nilai suseptibilitas magnetik yang rendah pula menunjukkan adanya keberadaan grabens dan aktivitas hidrotermal di bawah permukaan. Dalam sistem panas bumi batuan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik sedang sampai rendah umumnya adalah batuan sedimen [12]. Peta kontur anomali ini menunjukkan bahwa manifestasi Jari (Selo Gajah) berada di atas anomali rendah sedangkan manifestasi Banyukuning berada pada anomali sedang.

Analisa peta kontur anomali residual dilakukan dengan mengkorelasikan dari informasi peta geologi. Berdasarkan peta geologi menunjukkan bahwa daerah penelitian didominasi oleh breksi pandan (Qpv) dan batuan intrusi (Qia). Selain itu di sebelah timur laut dan barat laut daerah penelitian ditemukan endapan sedimen berupa formasi klitik (Tpk) dan formasi sonde (Tps). Pada bagian utara terdapat formasi kalibeng (TmPk) dan formasi kerek (Tmk), sedangkan pada bagian tengah sampai selatan didominasi oleh formasi pucangan (QTp).

Identifikasi reservoir panas bumi lebih dalam dilakukan dengan pemodelan ke depan menggunakan software Geosoft oasis montaj 8.4 seperti terlihat pada Gambar 4 dan 5. Pemodelan ke depan dibuat pada peta kontur anomali residual pada manifestasi Jari dan manifestasi Banyukuning. Berdasarkan hasil pemodelan ke depan (Gambar 4 dan 5) menunjukkan bahwa batuan yang diduga diamagnetik dan batuan intrusif merupakan sumber anomali bawah permukaan daerah penelitian.



Gambar 4. Hasil pemodelan 2D manifestasi jari (selo gajah)

Hasil pemodelan 2D manifestasi Jari (Gambar 4) memperlihatkan bahwa terdapat nilai suseptibilitas rendah pada lapisan ketiga. Penurunan nilai suseptibilitas diduga akibat dari sumber panas di bawah permukaan. Lapisan batuan ini diindikasikan telah mengalami demagnetisasi dengan nilai kontras suseptibilitas 0,0001 (cgs unit). Batuan ini diduga sebagai reservoir hidrotermal. Apabila dikorelasikan dengan peta geologi maka lapisan batuan ini diduga berada pada Formasi Kerek (Tmk) yang merupakan batupasir tuffaan. Lapisan kedua diduga berada pada Formasi Kalibeng (TmPk) yang merupakan lempung. Lapisan batuan ini diindikasikan sebagai lapisan penundung/caprock dari sistem panas bumi di daerah penelitian. Sedangkan lapisan pertama diduga merupakan breksi pandan (Qvp).

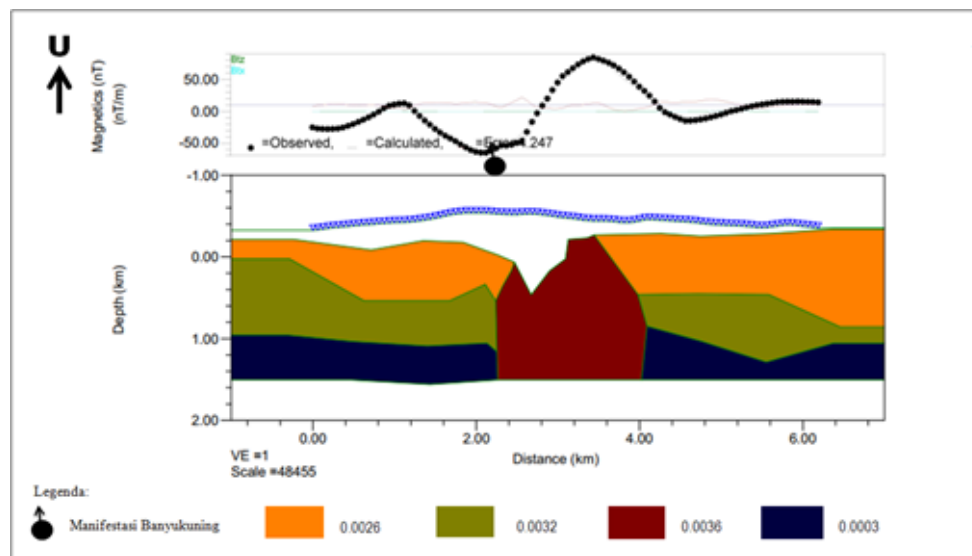
Tabel 1. Informasi hasil pemodelan 2D manifestasi jari (selo gajah)

Lapisan	Kedalaman (m)	Kontras Suseptibilitas (cgs unit)	Formasi	Litologi	Keterangan
1	0-500	0,0023	Qpv	Breksi Pandan	Batuan Terobosan
2	250-1000	0,0034	Tmpk	Lempung	Penundung/ <i>caprock</i>
3	500-1500	0,0001	Tmk	Batupasir Tufaan	Reservoir Hidrotermal
4	0-1500	0,0037	Qia	Andesit Piroksen	Batuan Intrusi

Hasil pemodelan 2D manifestasi Banyukuning (Gambar 5), menunjukkan bahwa terdapat nilai suseptibilitas rendah pada lapisan ketiga. Penurunan nilai suseptibilitas diduga akibat dari sumber panas di bawah permukaan. Lapisan batuan ini diindikasikan telah mengalami demagnetisasi dengan nilai kontras suseptibilitas 0,0003 (cgs unit) yang diduga sebagai reservoir hidrotermal. Apabila dikorelasikan dengan peta geologi maka lapisan batuan ini diduga berada pada Formasi Pucangan (QTp) yang merupakan breksi vulkanik. Lapisan kedua diduga berada pada Formasi Pucangan (QTp) yang merupakan lempung. Lapisan batuan ini diindikasikan sebagai lapisan penundung/*caprock* dari sistem panas bumi di daerah penelitian. Sedangkan lapisan pertama diduga merupakan breksi pandan (Qvp).

Tabel 2. Informasi hasil pemodelan 2D manifestasi banyukuning

Lapisan	Kedalaman (m)	Kontras Suseptibilitas (cgs unit)	Formasi	Litologi	Keterangan
1	0-500	0,0026	Qpv	Breksi Pandan	Batuan Terobosan
2	50-1000	0,0032	QTp	Lempung	Penundung/ <i>Caprock</i>
3	1000-1500	0,0003		Breksi Vulkanik	Reservoir Hidrotermal
4	0-1500	0,0036	Qia	Andesit Piroksen	Batuan Intrusi



Gambar 5. Hasil pemodelan 2D manifestasi banyukuning

Berdasarkan Gambar 4 dan 5, menunjukkan bahwa diperkirakan adanya batuan diamagnetik dan batuan intrusi yang menjadi sumber anomali di bawah permukaan daerah penelitian. Batuan intrusi tersebut diduga muncul karena keberadaan struktur sekunder berupa rekahan/*crack*. Batuan intrusi ini diduga merupakan batuan andesit piroksen (Qia). Berdasarkan informasi geologi daerah penelitian, terdapat struktur berupa sesar/patahan utama yang membujur dari Timur Laut ke Barat Laut. Sesar ini diduga sebagai sesar yang mempengaruhi munculnya manifestasi mata air panas. Pembentukan sesar utama diduga menyebabkan pembentukan struktur sekunder. Struktur sekunder ini diduga berpengaruh pada aktivitas hidrotermal di daerah penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa adanya struktur sekunder berupa rekahan/*crack* yang menjadi jalan keluarnya fluida panas ke permukaan dan muncul sebagai manifestasi air panas di Jari (Selo Gajah) dan

Banyukuning. Batuan dengan nilai kerentanan rendah diperkirakan merupakan reservoir panas bumi, karena reservoir panas bumi juga dapat dilihat dari nilai kerentanan batuan selain dari porositasnya. Jika dikorelasikan dengan peta geologi, maka batuan tersebut diperkirakan berada pada Formasi Pucangan (QTp) yang terletak di bagian Selatan daerah penelitian dan Formasi Kerek (Tmk) yang terletak di Utara yang merupakan breksi vulkanik dan batupasir tufaan. Reservoir hidrotermal manifestasi Jari (Selo Gajah) diduga berada pada kedalaman 500 m - 1500 m, sedangkan manifestasi Banyukuning diperkirakan pada kedalaman 1000 m - 1500 m. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya, dimana reservoir panas bumi pada daerah penelitian diduga berada pada batuan breksi vulkanik dan batupasir tufaan dengan kedalaman rata-rata adalah 590 m - 1500 m. Hasil penelitian ini telah memberikan informasi yang lebih detail dari penelitian sebelumnya oleh [3] terkait keberadaan reservoir dan kedalaman reservoir panas bumi.

4. Kesimpulan

Penelitian mengenai identifikasi reservoir panas bumi telah dilakukan di kompleks gunung Pandan Jawa Timur menggunakan metode magnetik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keberadaan dan kedalaman reservoir panas bumi berdasarkan nilai anomali magnetik. Berdasarkan hasil pengolahan data magnetik, diperoleh rentang nilai anomali magnetik -446,7 nT sampai 526,3 nT. Hasil pemodelan 2D menunjukkan bahwa terdapat beberapa struktur sekunder berupa rekahan/*crack* yang menjadi jalan keluarnya fluida panas menuju ke permukaan. Reservoir hidrotermal manifestasi Jari (Selo Gajah) diduga berada pada batupasir tufaan dengan kedalaman 500 m - 1500 m, sedangkan manifestasi Banyukuning diperkirakan berada pada breksi vulkanik dengan kedalaman 1000 m - 1500 m.

Daftar Pustaka

- [1] F. Fatimah, "Analisis Potensi Panas Bumi dengan Metode Geomagnet di Daerah Gedong Songo Ungaran Jawa Tengah," *Kurvatek*, vol. 2, no. 2, pp. 35-43, 2018, doi: 10.33579/krvtk.v2i2.548.
- [2] S. Maryanto, W. M. Maubana, A. Nadhir, dan R. P. Habsari, "Geomagnetic and Geochemical Observations in Mt. Pandan Volcano Hosted Geothermal Area, East Java, Indonesia," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2228, no. April, 2020, doi: 10.1063/5.0007281.
- [3] W. M. Maubana, S. Maryanto, I. W. Utami, dan A. Nadir, "Reservoir Magnetic Anomaly at Geothermal Area of Mount Pandan, East Java, Indonesia," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 887-892, 2019.
- [4] W. M. Maubana. U. S. Pedro, "Application of Magnetic Methods for Estimating Subsurface Rocks," *Sci. Educ. Appl. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 36-44, 2021.
- [5] A. Susilo, Sunaryo, K. Isdarmadi, dan Rusli, "Investigation of Jabung Temple Subsurface at Probolinggo, Indonesia using resistivity and geomagnetic methods," *Int. J. GEOMATE*, vol. 13, no. 40, pp. 74-80, 2017, doi: 10.21660/2017.40.39246.
- [6] L. W. Mawarni, "Magnetic Method Used In Geothermal Reservoirs Identification in Kasinan-Songgoriti, East Java, Indonesia," *EESRJ*, pp. 87-93, 2018, doi: 10.18280/eesrj.050402.
- [7] S. A. Rohmah, S. Maryanto, dan A. Susilo, "Identifikasi Air Tanah Daerah Agrotechno Park Cangar Batu Jawa Timur Berdasarkan Metode Geolistrik Resistivitas," no. January, 2018, doi: 10.12962/j24604682.v14i1.3106.
- [8] D. Y. U. Nuha, S. Maryanto, dan D. R. Santoso, "Determination of the Direction of Hot Fluid Flow in Cangar Area, Arjuno-Welirang Volcano Complex, East Java Using Self Potential Method," *J. Penelit. Fis. dan Apl.*, vol. 7, no. 2, p. 123, 2017, doi: 10.26740/jpfa.v7n2.p123-132.
- [9] C. N. Dewi, S. Maryanto, dan A. Rachmansyah, "Sistem Panas Bumi Daerah Blawan , Jawa Timur Berdasarkan Survei Magnetotelurik," *Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 25, no. 2, pp. 111-119, 2015, doi: 10.14203/risetgeotam2015.v25.
- [10] A. M. Asrul, R. Efendi, dan S. Sandra, "Pemodelan Reservoir Panas Bumi Menggunakan Metode Geomagnet di Desa Lengkeka Kecamatan Lore Barat, Kabupaten Poso," *Gravitasi*, vol. 17, no. 2, pp. 1-9, 2019, doi: 10.22487/gravitasi.v17i2.12417.
- [11] I. N. Manyoc, U. ria Irfan, dan D. A. Suriamiharja, "Penampang Anomali Geomagnetik dan Geolistrik Daerah Panas Bumi Bongongoayu, Gorontalo," *e-Journal Pasca UNHAS*, no. 6, 2015.
- [12] R. A. Afandi A, dan Maryanto S, "Identification of Geothermal Reservoir with Geomagnetic Method of the Blawan Area in the Subdistrict of Bondowoso," *J. Neutrino*, pp. 1-10, 2016.