

Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Ijen Jawa Timur Berdasarkan Pemodelan 2 Dimensi Anomali Geomagnetik

Identification of Geothermal Reservoir Zone at Mount Ijen East Java Based on 2 Dimensional Modeling of Geomagnetic Anomalies

Alimuddin Muchtar ^{a*}, Zelica K. M. Manurung ^a, Rustadi ^a, Yasa Suparman ^b, M. Ishak Jumarang ^c

^a Teknik Geofisika Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brodjonegoro No. 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung; telp (0721) 704947

^b Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Jl. Diponegoro No.57, Bandung; telp (022) 7272606

^c Program Studi Geofisika FMIPA Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak.

*Email : alimuddin.geofisika@eng.unila.ac.id

(Diterima 9 September 2021; Disetujui 4 April 2022; Dipublikasikan 31 Mei 2022)

Abstrak

Komplek Gunung api Ijen merupakan prospek panas bumi yang terletak di Kabupaten Bondowoso, Jawa Timur. Sistem panas bumi Gunung api Ijen ditandai oleh kawah danau berfluida asam dan solfatara bertemperatur tinggi. Beberapa batuan teralterasi di dekat Gunung Kukusan dan sekelompok mata air panas Blawan di bagian utara kaldera. Pengukuran magnetik dilakukan pada 175 titik tersebar di dalam kaldera melingkupi kawah Gunung Ijen hingga Gunung Merapi. Anomali intensitas magnetik total diperoleh melalui koreksi standard IGRF dan variasi diurnal. Metode reduksi ke kutub (RTP) diterapkan dengan inklinasi geomagnet sekitar -32° . Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa anomali magnetik tinggi berasosiasi dengan jalur patahan yang menghasilkan pembentukan gunung api baru di bagian selatan, Sedangkan anomali magnetik rendah berada berdekatan dengan kawah Ijen dan Gunung Merapi di bagian timur. Anomali yang rendah ditafsirkan oleh dua kemungkinan pengaruh demagnetisasi batuan akibat kontak termal atau pengaruh remanen batuan dengan umur geologi tertentu menghasilkan polaritas reversal. Anomali intensitas magnet total tinggi pada komponen regional berada 50 hingga 114 nT dan anomali rendah berada di kisaran -850 hingga -750 nT, hal ini ditafsirkan bahwa potensi batuan panas di Komplek Gunung api Ijen tersebar sesuai keberadaan kaldera dan jalur gunung api muda. Prospek batuan panas berkorelasi dengan Formasi batuan gunung api muda dan intrusi magmatic hasil proses pembentukan gunung api berumur Kuartar.

Kata kunci: sistem panas bumi, suseptibilitas, zona reservoir

Abstract

Ijen Volcano Complex is a geothermal prospect located in Bondowoso Regency, East Java. The geothermal system of Ijen Volcano is characterized by the craters of acid-coated lakes and high-temperature solfatara. Some of the rocks are altered near Mount Kukusan and a cluster of Blawan hot springs in the northern part of the caldera. Magnetic measurements were carried out at 175 points spread inside the caldera covering the crater of Mount Ijen to Mount Merapi. Anomalies in total magnetic intensity are obtained through the correction of IGRF standards and diurnal variations. Reduce to pole method (RTP) is applied by a geomagnetic inclination of about -32° . In general, the results showed that high magnetic anomalies are associated with fault lines that result in the formation of new volcanoes in the south, while low magnetic anomalies are adjacent to Ijen craters and Mount Merapi in the east. Low anomalies are interpreted by two possible influences of demagnetization of rocks due to thermal contact or the influence of remanent rocks of a certain geological age resulting in polarity reversal. The anomaly of high total magnetic intensity in the regional component is 50 to 114 nT and the low anomaly is in the range of -850 to -750 nT, this is interpreted that the potential for hot rock in the Ijen Volcano Complex is spread out according to the presence of a caldera and young volcanic pathways. The prospect of hot rocks correlates with young volcanic rock formations and magmatic intrusion resulting from the process of formation of quaternary-aged volcanoes.

Keywords: Geothermal systems, reservoir zone, susceptibility

1. Latar Belakang

Komplek Gunung api Ijen merupakan potensi panas bumi vulkanik yang terdapat di wilayah Kabupaten Banyuwangi dan Bondowoso, Provinsi Jawa Timur (1,2). Sistem perpindahan termal yang dipanaskan oleh pegunungan vulkanik muda biasa dideskripsikan dengan istilah 'sistem panas bumi vulkanik'. Pada sisi lereng merupakan *discharge* fluida dominan netral (pH) oleh aliran advectif dan beberapa tercampur *upflow* atau *outflow* fluida netral (pH) dari reservoir temperatur (T) tinggi secara konvektif, selain itu beberapa *discharge* oleh cairan asam dan cairan magmatik keluar dari saluran di wilayah puncak atau melalui saluran *feeder* curam yang menyalurkan kondensat asam dan jejak cairan magmatik, hal ini menunjukkan karakteristik dari panas bumi vulkanik (2).

Komplek Gunung api Ijen yang saat ini terlihat terbentuk melalui berbagai proses yang panjang. Pembentukan Kompleks Gunung api Ijen prosesnya dapat diketahui dengan memperhatikan kondisi morfologi permukaan Gunung api Ijen yang terlihat sekarang. Komplek Gunung api Ijen berasal dari satu tubuh Gunung Ijen. Van Bergen memperkirakan ketinggian gunung api purba tersebut mencapai 3.500 mdpl (3). Sebelum terjadi erupsi eksplosif, tubuh Gunung api Ijen dimungkinkan berupa kerucut gunung api yang besar dan aktif.

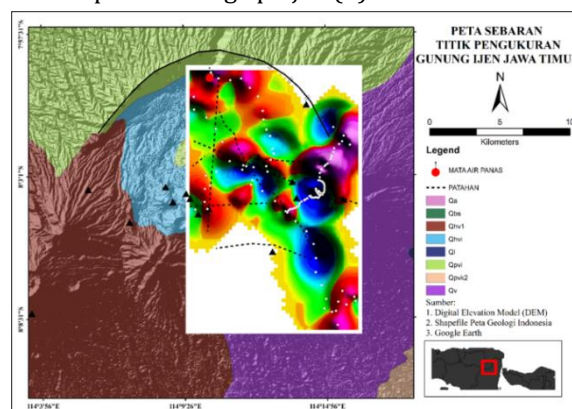
Total erupsi yang terjadi pada Gunung api Ijen adalah 7 erupsi eksplosif yang melontarkan sebagian besar material tubuh gunung api bagian atas dan menciptakan kaldera dengan diameter 14-16 km. Kaldera menjadi manifestasi yang menghasilkan danau dengan pH air sangat asam mendekati nol sebagai indikasi magmatis kaya dengan berbagai gas asam. Solfatara yang terbentuk memiliki suhu mencapai 200°C, mengindikasikan batuan plutonik yang masih panas. Solfatara mampu menghasilkan endapan sulfur yang berlimpah. Keberadaan mata air panas tersebar di bagian utara (3).

Erupsi besar juga mengakibatkan terbentuknya sesar-sesar pada dinding bagian selatan, diikuti pembentukan pusat-pusat aktivitas vulkanik baru pasca letusan besar. Deretan gunung api di sebelah selatan terlihat mengikuti sebuah pola garis dengan orientasi barat daya-timur laut. Berturut-turut Gunung Raung di sebelah barat sampai Gunung Merapi di sebelah timur. Pola garis yang teratur dari deretan gunung api-gunung api ini

mengindikasikan bahwa terdapat keteraturan pusat aktivitas magmanya (3,4). Bagian selatan Komplek Gunung api Ijen merupakan deretan vulkanik yang paling muda dan diharapkan masih menyimpan termal lebih besar dari bagian lainnya (4). Penelitian bertujuan memetakan keberadaan batuan sebagai sumber panas dan prospek reservoir panas bumi Komplek Gunung api Ijen.

2. Metodologi

Gunung api Ijen Tua diperkirakan terbentuk sekitar Pleistosen. Kaldera yang terlihat sebagai danau Kawah Ijen, terbentuk dari letusan Plinian. menyemburkan 80 km³ material vulkanik. Bagian selatan membentuk vulkanik muda dengan umur 0,2-0,05 Ma. Beberapa patahan ditemukan di kaldera dan meluas tepat di tengah kaldera, beberapa di tepian kaldera di bagian utara. Di Komplek Gunung api ijen, beberapa struktur adalah Sesar Blawan, Sesar Kawah Wurung, Sesar Krepekan, Sesar Cemara-Kukusan, Sesar Kalipahit-Banyulinu, Sesar Djampit, Sesar Rante, Sesar Pawenan-Blau dan Sesar Kendeng-Merapi (Gambar 1). Deformasi tersebut dapat disebabkan oleh aktivitas tektonik, pengisian magma di dalam kantung magma, atau kolaborasi keduanya yang mengaktifkan kembali struktur lantai kaldera (3). Pemandian air panas di daerah Blawan menunjukkan bahwa permeabilitas sekunder akan mempengaruhi terjadinya manifestasi panas bumi di Komplek Gunung api ijen (4).



Gambar 1. Peta geologi regional Komplek Gunung api Ijen. Titik hitam dan putih menyatakan titik pengukuran magnetik.

Prinsip dasar pemetaan geologi bawah permukaan melalui kemagnetan material dipengaruhi oleh kontras suseptibilitas penyusun (5,6). Kasus di mana geologi tersusun oleh komposisi batuan beku di lingkungan vulkanik,

ditafsirkan memiliki sifat kemagnetan lebih tinggi dari lapisan penutup yang tersusun oleh produk gunung api berupa material piroklastik dan produk alterasi.

Sifat kemagnetan pada batuan beku akan mengalami penguraian saat terpapar oleh temperatur tinggi yang dinyatakan sebagai temperatur Curie. Reservoir magma pada vulkanik aktif, dapat memiliki temperature tinggi di atas 900°C melebihi titik kritis temperatur Curie. Asumsi keberadaan panas yang dapat mengganggu sifat kemagnetan di lingkungan vulkanik, menjadikan pemetaan magnetic banyak digunakan dalam eksplorasi panas bumi (7,8,9).

Sejumlah 175 titik observasi magnetic di permukaan dengan jarak spasi 400 m distribusi secara acak, telah dilakukan untuk mendapatkan informasi awal panas bumi di Komplek Gunung api Ijen. Pengukuran menggunakan instrumen PPM GEM-19T.

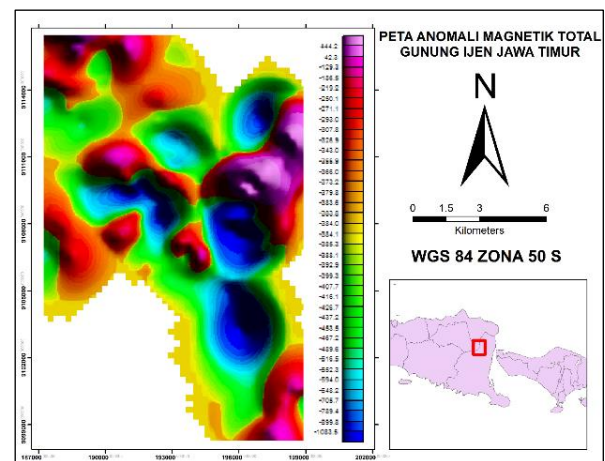
Nilai anomali magnetik hasil dari pengukuran dilakukan koreksi standar berupa koreksi IGRF dan koreksi variasi harian. Pengolahan data dan pemfilteran menggunakan perangkat Oasis Montaj. Teknik reduksi ke kutub (RTP) dilakukan dengan mereduksi data magnetik dengan sudut kemiringan -32°. Pendekatan digunakan untuk penyederhanaan anomali sebagai benda monopol Kontek untuk daerah penelitian adalah mendapatkan respon reservoir panas bumi yang terletak tepat di bawah anomali magnetik rendah (10). Sedangkan proses kontinuitas ke atas dilakukan untuk memisahkan antara sumber regional dan residual dari Komplek Gunung api Ijen. Kontinuitas ke atas untuk mendapatkan komponen regional dilakukan dengan pengangkatan hingga ketinggian 500 meter.

4. Hasil dan Pembahasan

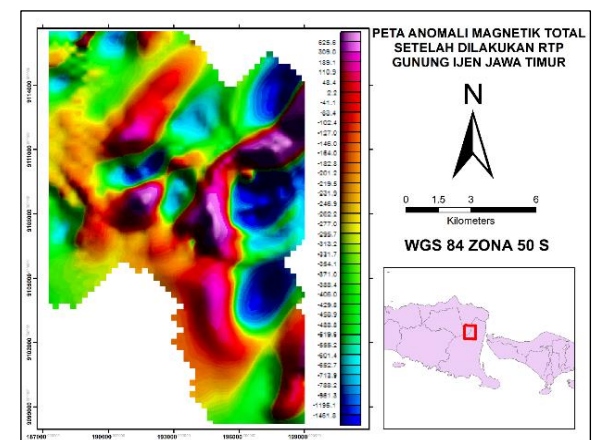
Peta intensitas magnet total (TMI) Komplek Gunung api Ijen diperlihatkan pada Gambar 2. Variasi nilai intensitas magnetik dari nilai tinggi ditunjukkan dengan warna merah sampai merah muda dan nilai rendah ditunjukkan dengan warna biru. Nilai anomali intensitas magnetik tinggi bernilai 42 – 444,2 nT, sedangkan anomali rendah -700 sampai dengan -1083,5 nT.

Informasi pada Gambar 2 masih bersifat dipole yang menjadi kompleks untuk melakukan interpretasi secara kualitatif. Penggunaan reduksi ke kutub (RTP) pada peta TMI memberikan penyederhanaan secara signifikan, yang

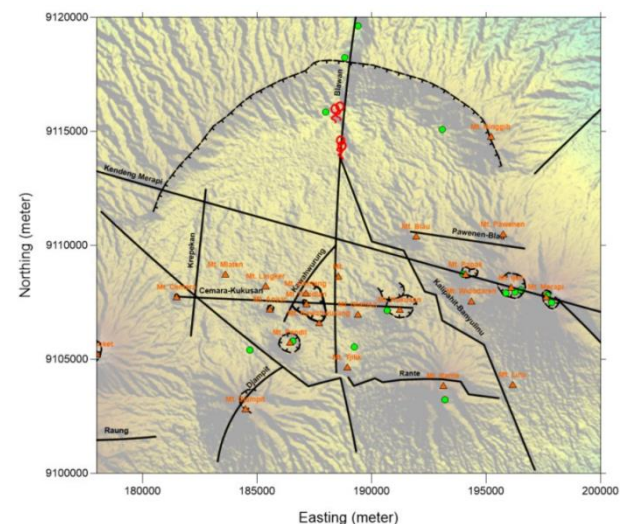
menguraikan sifat dipole menjadi monopol dari benda anomali bawah permukaan. Peta anomali magnetik total setelah dilakukan *reduce to pole* (RTP) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Peta intensitas magnet total (TMI) Komplek Gunung api Ijen.



Gambar 3. Peta anomali magnetik total setelah dilakukan RTP



Gambar 4. Struktur yang berperan sebagai zona permeable di Komplek Gunung api Ijen (10).

Pola anomali negatif yang terbentuk di tengah Komplek Gunung api Ijen ditafsirkan berasosiasi dengan keberadaan batuan terdemagnetisasi hidrotermal Gunung Kukusan(10). Area anomali rendah tersebut ditandai oleh produk alterasi dipicu oleh sumber panas di dekat Gunung Kukusan. Lokasi zona prospek juga diperkuat dengan perpotongan beberapa patahan; Sesar Blawan, Sesar Cemara-Kukusan, dan Sesar Kawah Wurung (Gambar 4) yang dapat membentuk zona permeabel tinggi (10).

Pemfilteran kontinuitas ke atas dilakukan pada anomali magnetik total yang sudah direduksi ke kutub diperoleh hingga ketinggian 500 m yang menunjukkan kestabilan komponen regional. Anomali regional ditafsirkan berkaitan dengan batuan vulkanik dari Gunung Ijen purba dan terobosan-terobosan *conduit* berbagai gunung berumur muda di kawasan kaldera (Gambar 4).

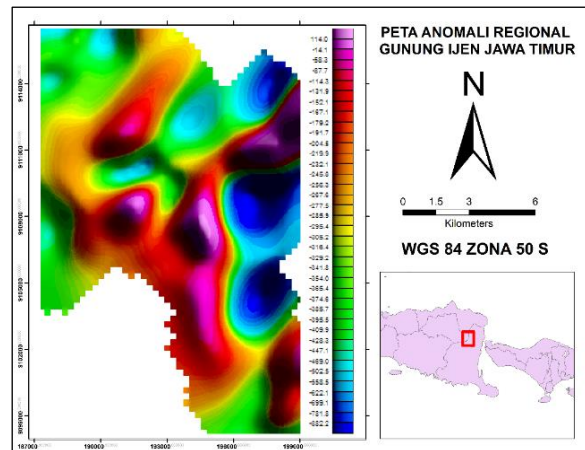
Anomali intensitas magnet total tinggi pada komponen regional berada 50–114 nT. Anomali tinggi berada di bagian tengah dan timur, di jalur – jalur patahan (Gambar 5). Proses pendinginan pada reservoir magma telah menghasilkan respon magnetik tinggi di area gunung api muda berumur Kuartar. Adapun anomali rendah berada di kisaran negative 750–850 nT, terletak di bagian timur.

Respon anomali tinggi dan anomali rendah pada komponen residual, memiliki posisi mirip dengan komponen regional. Anomali tinggi berada di bagian tengah hingga sisi timur, sedangkan anomali rendah berada di bagian timur (Gambar 6). Komponen residual mencerminkan respon dari benda dangkal di kedalaman kurang dari 1 km.

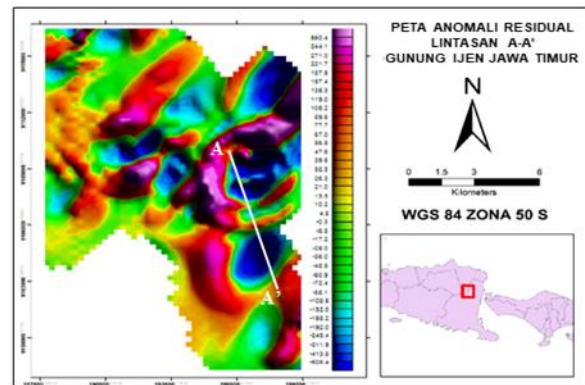
Interpretasi kuantitatif sifat kemagnetan batuan penyusun di lokasi anomali rendah dilakukan pada model lintasan A-A' dengan hasil diperlihatkan pada Gambar 7. Lintasan A-A' bagian Utara terletak diantara Kawah Gunung Ijen dan Gunung Merapi sedangkan bagian Selatan terletak dekat Gunung Ranti. Tiga formasi batuan terkait di lintasan A-A', meliputi; Formasi Batuan Ijen Tua (Qpvi), Formasi Batuan Ijen Muda (Qhvi), dan Formasi Batuan Gunung api Muda (Qv). Formasi Batuan Ijen Tua (Qpvi) terbentuk sekitar 1,7 juta tahun lalu atau pada masa Kuartar Pleistosen. Formasi Batuan Ijen Muda (Qhvi) dan Formasi Batuan Gunung api Muda (Qv) terbentuk sekitar 0,01 juta tahun lalu atau pada masa Kuartar Holosen.

Model di lintasan A-A' menyiratkan anomali tinggi dan anomali rendah disebabkan oleh

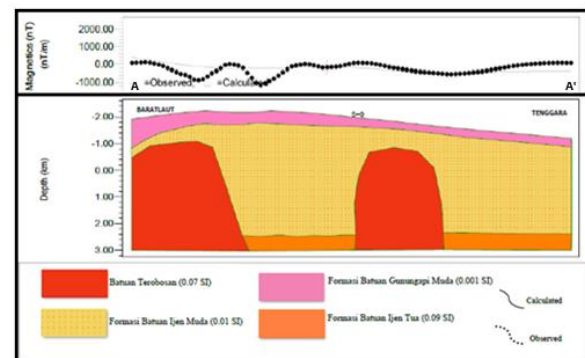
komposisi batuan vulkanik; Formasi Batuan Ijen Tua (Qpvi) dengan suseptibilitas 0,09 SI tersusun oleh breksi gunung api, breksi batu apung, tuf dan lava basal. Batuan Terobosan memiliki nilai suseptibilitas 0,07 SI terdiri dari andesit-basal. Formasi Batuan Ijen Muda (Qhvi) dengan suseptibilitas 0,01 SI terdiri dari tuf, breksi gunung api, lava dan belerang. Lapisan penutup Formasi Batuan Gunung api Muda (Qv) dengan suseptibilitas 0,001 SI.



Gambar 5. Komponen anomali regional



Gambar 6. Kontur anomali residual



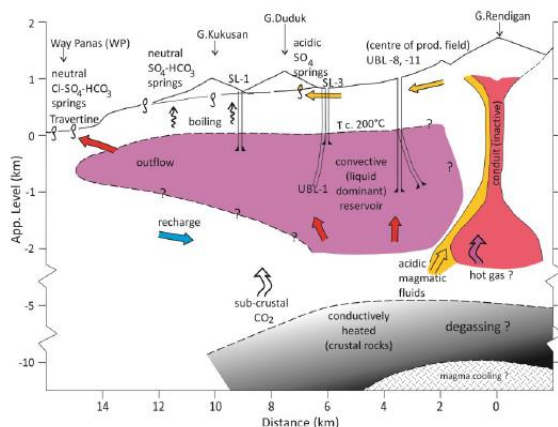
Gambar 7. Model 2D bawah permukaan di area anomali rendah.

Demagnetisasi reservoir oleh pengaruh suhu Curie menjadi masalah utama dalam penafsiran

keberadaan prospek reservoir melalui pemetaan magnetik. Merujuk pada hasil eksplorasi panas bumi Di Komplek Gunung Ulubelu – Rendingan (11,12), anomali rendah tidak secara spesifik sebagai reservoir. Sumur –sumur produksi berhasil mendapatkan temperature tinggi mencapai 320° dengan kedalaman lebih dari 1,4 km di berbagai jenis batuan beku kategori produk gunung api muda. Sebaran sumur produksi berada di area kaldera dari Ulubelu purba, dengan batuan beku beragam berupa dasit, riolit dan andesit sebagai penyusun di Gunung Duduk, Gunung Kukusan dan Gunung Rendingan (11,13).

Distribusi sumur di Ulubelu berada pada anomali magnet total -300 nT hingga 300 nT (11). Rekonstruksi prospek termal 200–320° diberagam batuan beku berumur Kuartar di Komplek Gunung api Ulubelu, ditafsirkan tersebar secara luas oleh Hochstein dkk (2) seperti diperlihatkan pada Gambar 8.

Interpretasi kualitatif keberadaan zona temperatur tinggi di Komplek Gunung api Ijen ditafsirkan dapat serupa dengan lapangan panas bumi Komplek Gunung api Ulubelu di Tanggamus, Lampung. Prospek batuan yang masih memiliki temperature tinggi berkorelasi dengan keberadaan Formasi Batuan Gunung api Muda dan intrusi magmatik yang menjadi penyusun berbagai gunung api muda yang terbentuk di area kaldera Gunung api Ijen purba. Manifestasi solfatara bertemperatur 200°C di kolam kawah Ijen, menjadi referensi kuat keberadaan sumber panas. Beberapa peneliti turut menafsirkan keberadaan Gunung Ijen muda sebagai gunung api aktif (14).



Gambar 8. Model kuantitatif sistem panas bumi Gunung api Ulubelu (2).

Untuk mengikat interval nilai anomali magnetik terkait oleh pengaruh panas di reservoir Komplek Gunung api Ijen, tentunya diperlukan beberapa hasil pemboran dan pengukuran gradient termal. Interpretasi keberadaan anomali magnetic rendah bernilai negatif ratusan – ribuan nano Tesla, dapat dipengaruhi oleh remanen batuan dengan umur geologi tertentu menghasilkan pola magnetik reversal.

5. Kesimpulan

Interpretasi keberadaan batuan sebagai sumber panas dan prospek reservoir panas bumi Komplek Gunung api Ijen melalui respon kemagnetan memiliki keterbatasan oleh kontribusi remanen. Nilai anomali rendah -1083,5 nT tidak secara sederhana dapat diasumsikan oleh pengaruh demagnetisasi. Anomali intensitas magnet total tinggi pada komponen regional berada 50–114 nT. Anomali intensitas magnet total tinggi pada komponen regional berada 50 hingga 114 nT dan anomali rendah berada di kisaran -850 hingga -750 nT, hal ini ditafsirkan bahwa potensi batuan panas di Komplek Gunung api Ijen tersebar sesuai keberadaan kaldera dan jalur gunung api muda. Prospek panas berada pada Formasi batuan gunung api muda dan intrusi magmatic bagian dari proses pembentukan gunung api berumur Kuartar di area Gunung api Ijen purba.

6. Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terimakasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) dan semua pihak yang mendukung suksesnya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Raehanayati R., Rachmansyah A., dan Maryanto S.. Studi Potensi Energi Geothermal Blawan-Ijen, Jawa Timur Berdasarkan Metode Gravity. *J Neutrino*. 2013;31.
- [2] Hochstein M.P., and Sudarman S. Indonesian Volcanic Geothermal Systems. *World Geotherm Congr 2015*. 2015;(April):11.
- [3] Sartohadi J., Sianturi R.S., Rahmadana A.D.W., Maritimo F., Wacano D., Munawaroh, Suryani T., dan Pratiwi E.S., Bentang Sumberdaya Lahan Kawasan gunung api Ijen dan sekitarnya. Penerbit Pustaka Pelajar, Yogyakarta
- [4] Daud Y., Sudarman S., and Ushijima K. Integrated Geophysical Studies of the Ulubelu Geothermal Field, South Sumatera, Indonesia. *Proc World Geotherm Congr*. 2000;1071–6.

- [5] El All E.A., Khalil A., Rabeh T., and Osman S.. Geophysical contribution to evaluate the subsurface structural setting using magnetic and geothermal data in El-Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. *NRIAG J Astron Geophys* [Internet]. 2015;4(2):236-48. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2015.09.003>
- [6] Singhroy V.H., and Pilkington M.. Geological mapping using earth's magnetic field. *Encycl Earth Sci Ser*. 2014;(May):232-7.
- [7] Mawarni L., Maryanto S., and Nadhir A.. Magnetic method used in geothermal reservoirs identification in Kasinan-Songgoriti, East Java, Indonesia. *Environ Earth Sci Res J*. 2018;5(4):87-93.
- [8] Rusydy I, and Setiya G. Application of Magnetics Method to Mapping the Geothermal Source at Seulawah Agam Area. *Appl Magn Method to Mapp Geotherm Source Seulawah Agam Area*. 2014;14(2):12-8.
- [9] Mohammadzadeh-Moghaddam M., Oskooi B., and Mirzaei M., Jouneghani S.J. Magnetic studies for geothermal exploration in Mahallat, Iran. 2012;(December 2015):1-4.
- [10] Daud Y., Rosid S., Fahmi F., Yunus F.M., and Muflihendri R. Geomagnetic Survey to Explore High-Temperature Geothermal System in Blawan-Ijen, East Java, Indonesia. *E3S Web Conf*. 2018;31:1-4.
- [11] Mulyadi. Ulubelu, The Most Developed Geothermal Area in South Sumatera. *Proc World Geotherm Congr 2000*. 2000;1463-8.
- [12] Suharno. Characteristics of The Ruw Geothermal System. *J. Sains Tek*, 2004;(1).
- [13] Siahaan E.E., Sasradipoera D.S., and Silitonga T.H., Pelmelay C., Koestono H., Mubarok M.H., and Rifki G. Success development drilling in Ulubelu green field in South Sumatra based on geological structure evidence, generate 4X55 MW. *World Geotherm Congr 2015*. 2015;(April).
- [14] Zaenudin M., Muhammad H., Heri A., Muhammad G., Mipi A. K., Umar R., Iyan M., Dedi M., Ony K. S., Bambang H.. and Fumiaki K. Karakteristik Deformasi Gunung api Ijen dalam Periode 2002-2005 Hasil Estimasi Metode Survei GPS. *ITB J Sci*. 2007;39(1&2):1-22.