

**IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI
GUNUNG IJEN JAWA TIMUR BERDASARKAN
PEMODELAN 2 DIMENSI ANOMALI GEOMAGNETIK**

(Skripsi)

**Oleh
ZELICA KRISMALIA MARSAULI MANURUNG
NPM 1715051052**



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2021**

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL RESERVOIR ZONE MOUNT IJEN EAST JAVA BASED ON 2 DIMENSIONAL MODELING OF GEOMAGNETIC ANOMALIES

By

ZELICA KRISMALIA MARSAULI MANURUNG

Indonesia has a complex tectonic order, causing boundary meetings between moving plates to be the location of geothermal systems. One of the main requirements in the formation of geothermal systems (hydrothermal) is to have a reservoir to accumulate heat. Mount Ijen complex is one of Indonesia's volcanoes that has geothermal potential. The research was conducted in Mount Ijen area using magnetic method. The results identified that the eastern part of the research area with a magnetic intensity value range from -132 nT to - 606.4 nT as the location of the geothermal zone. Two-dimensional cross-sectional modeling was carried out to determine the possible location of the geothermal reservoir zone. As the result, the value of rock susceptibility in the reservoir zone of 0.01 SI was found at an altitude between 1500 meters to 1700 meters.

Keyword: geothermal systems, reservoir zone, susceptibility

ABSTRAK

IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG IJEN JAWA TIMUR BERDASARKAN PEMODELAN 2 DIMENSI ANOMALI GEOMAGNETIK

Oleh

ZELICA KRISMALIA MARSAULI MANURUNG

Indonesia memiliki tatanan tektonik yang kompleks, menyebabkan batas pertemuan antar lempeng yang bergerak menjadi lokasi sistem panas bumi. Salah satu persyaratan utama dalam pembentukan sistem panas bumi (hidrotermal) yaitu mempunyai reservoir untuk mengakumulasi panas. Kompleks Gunung Ijen merupakan salah satu gunungapi Indonesia yang memiliki potensi panas bumi. Penelitian dilakukan pada daerah Gunung Ijen dengan menggunakan metode magnetik. Hasil penelitian mengidentifikasi bahwa bagian timur daerah penelitian dengan rentang nilai intensitas magnetik dari -132 nT sampai -606.4 nT sebagai letak dari zona panas bumi. Pemodelan penampang 2 dimensi dilakukan untuk menentukan kemungkinan letak dari zona reservoir panas bumi. Sehingga diperoleh nilai susceptibilitas batuan pada zona reservoir 0.01 SI yang dijumpai pada ketinggian antara 1500 meter sampai 1700 meter.

Kata kunci: sistem panas bumi, zona reservoir, susceptibilitas

**IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI
GUNUNG IJEN JAWA TIMUR BERDASARKAN
PEMODELAN 2 DIMENSI ANOMALI GEOMAGNETIK**

Oleh

Zelica Krismalia Marsauli Manurung

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Universitas Lampung



KEMENTRIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS LAMPUNG

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA

2021

Judul Penelitian : **IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS
BUMI GUNUNG IJEN JAWA TIMUR
BERDASARKAN PEMODELAN 2 DIMENSI
ANOMALI GEOMAGNETIK**

Nama Mahasiswa : **Zelica Krismalia Marsauli Manurung**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051052

Jurusan : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



Pembimbing I

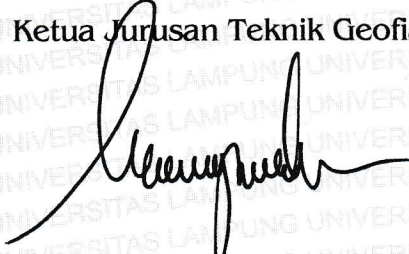
1. Komisi Pembimbing,

Pembimbing II


Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.
NIP. 197206262000121001


Rustadi, S.Si., M.T.
NIP. 197205111997101002

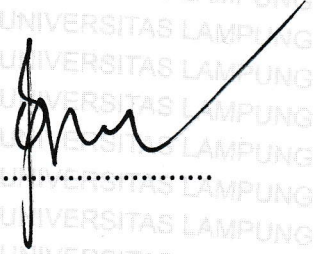
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912301998021001


MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

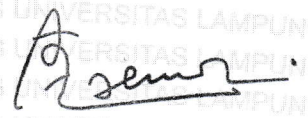
Ketua : **Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.**



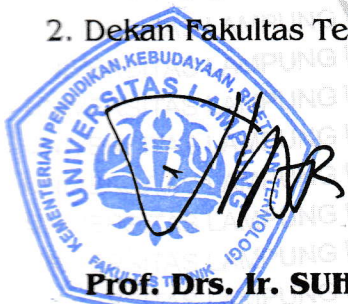
Sekretaris : **Rustadi, S.Si., M.T.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Ir. Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. SUHARNO, Ph.D., IPU., ASEAN.Eng.
NIP. 19620717 198703 1002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **30 Juli 2021**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya saya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandarlampung, 04 Agustus 2021



Zelica Krismalia Marsauli Manurung

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandarlampung, Provinsi Lampung pada tanggal 02 Maret 1999. Penulis merupakan anak pertama dari Bapak Andi B. Manurung dan Ibu Roliah br. Sinurat. Penulis menyelesaikan Pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di TK Xaverius 3 Bandarlampung pada tahun 2005. Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SD Xaverius 3 Bandarlampung yang selesai pada tahun 2011. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 19 Bandarlampung yang selesai pada tahun 2014. Selanjutnya, Pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 13 Bandarlampung yang selesai pada tahun 2017.

Pada tahun 2017, penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi melalui jalur masuk PMPAP dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Pada tahun 2018 sampai 2019 penulis menjabat sebagai anggota Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga (KRT), kemudian menjadi Sekretaris Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga (KRT) dari tahun 2019 sampai 2020, Himpunan Mahasiswa (HIMA) TG Bhuwana, Universitas Lampung. Pada tahun 2018 sampai 2020 penulis juga menjadi anggota Seksi Persekutuan Umum, PMK Perkantas Lampung. Pada tahun 2018 sampai 2020 penulis menjabat sebagai anggota Seksi Keanggotaan dan Dana Usaha, kemudian menjadi Sekretaris II dari tahun 2020 sampai 2022, P3MI Distrik 2 Wilayah II. Pada tahun 2019 sampai 2020 penulis menjabat sebagai anggota Divisi Public Relation (PR), kemudian menjadi anggota Divisi Fieldtrip dari tahun 2020 sampai 2021, SEG SC Universitas Lampung. Pada tahun yang sama penulis juga menjadi anggota

Divisi Edukasi, kemudian menjadi anggota Divisi Fieldtrip, SM-IAGI Universitas Lampung.

Pada pertengahan tahun 2020 penulis melakukan Kerja Kuliah Nyata (KKN) di Kelurahan Jati Mulyo, Kecamatan Jati Agung, Lampung Selatan. Di dalam pengaplikasian ilmu di bidang Teknik Geofisika penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Bandung pada awal tahun 2020 dengan judul laporan “Pemodelan Inversi 2D Data Magnetik pada Kawah Ijen, Jawa Timur”. Pada akhir masa studi, penulis melakukan Tugas Akhir, dengan mengambil judul “Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Ijen Jawa Timur Berdasarkan Pemodelan 2 Dimensi Anomali Geomagnetik” dan telah menyelesaikan Pendidikan sarjana Teknik pada tanggal 30 Juli 2021.

PERSEMBAHAN

Puji syukur kupanjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus
atas pertolongan, penyertaan, dan kebaikan-Nya sehingga saya dapat
menyelesaikan skripsi ini

Kupersembahkan Kepada:

Bapak dan Mama Terkasih

Terimakasih untuk setiap doa dan dukungan yang selalu kalian berikan kepadaku.

Terimakasih untuk tidak pernah menyerah atasku.

Aku sayang kalian.

Bapak dan Ibu Dosen Terhormat

Sebagai tanda hormatku, terimakasih untuk ilmu yang selama ini telah diberikan.

dan

Teknik Geofisika 2017

Almamater Tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Selalu bersyukur”

Zelica Krismalia Marsauli Manurung

“I am able to do all things through the one who strengthens me”

Philippians 4:13 (NET)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus yang telah senantiasa memberkati dan menyertai penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG IJEN JAWA TIMUR BERDASARKAN PEMODELAN 2 DIMENSI ANOMALI GEOMAGNETIK”**. Skripsi ini merupakan bagian dari persyaratan dalam meraih gelar S-1 Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Harapan penulis dengan adanya penelitian ini, semoga dapat menambah ilmu dalam bidang Geofisika khususnya dalam Eksplorasi Panas Bumi. Dalam pelaksanaan dan penulisan laporan ini, penulis menyadari masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat dibutuhkan agar kedepannya penulis dapat memberikan yang lebih baik lagi.

Demikian pengantar dari penulis, semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk masa kini dan mendatang.

Penulis,

Zelica Krismalia Marsauli Manurung

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yesus Kristus yang senantiasa memberkati dan menyertai penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG IJEN JAWA TIMUR BERDASARKAN PEMODELAN 2 DIMENSI ANOMALI GEOMAGNETIK”**. Dalam pelaksanaan dan penyelesaian skripsi ini, tentunya tidak lepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orangtua saya, Bapak dan Mama tercinta yang selalu berdoa dan mendukung saya dalam segala hal.
2. Bapak Karyanto, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
3. Bapak Bagus Spto Mulyatno, S.Si., M.T. selaku Pembimbing Akademik selama saya menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Geofisika.
4. Bapak Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si., Bapak Rustadi, S.Si., M.T., dan Bapak Ir. Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku Pembimbing dan Penguji saya yang memberikan bimbingan, arahan, saran serta motivasi bagi saya selama mengerjakan tugas akhir ini.
5. Bapak Yasa Suparman, S.T., M.Si. selaku pembimbing saya saat Kerja Praktik yang mengizinkan saya menggunakan data yang digunakan pada tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen dan Staff Tata Usaha Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung yang banyak memberikan ilmu dan bantuan dalam administrasi.
7. Teman-teman P3MI Labuhan Dalam yang mendukung dan mendoakan saya dalam menyelesaikan tugas akhir.

8. Teman seiman di Teknik Geofisika “A”, yaitu Bryan, Paulus, Rizky dan Nico yang memberikan semangat bagi penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Teman terkasih “KK KITA”, yaitu Angel dan Kak Ester yang mendukung, menemani dan berdoa bersama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Angkatanku Teknik Geofisika 2017 yang mendukung saya dalam menyusun laporan ini.
11. Laboratorium Geofisika Mitigasi Bencana Geologi sebagai tempat saya berdiskusi dan mengerjakan tugas akhir.
12. Serta semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir ini.

Semoga Tuhan Yesus Kristus yang mencurahkan berkat berlimpah atas bantuan dari semua pihak. Penulis menyadari bahwa banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan mendatang. Penulis juga berharap semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua yang membaca. Amin.

Bandarlampung, 04 Agustus 2021

Penulis

Zelica Krismalia Marsauli Manurung

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	i
ABSTRAK	ii
PERSETUJUAN	iv
PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Geologi Daerah Penelitian.....	4
2.2 Penelitian Terdahulu.....	11
III. TEORI DASAR	
3.1 Metode Magnetik.....	14
3.2 Medan Magnet Bumi.....	14

3.3 Suseptibilitas Batuan.....	17
3.4 Pengolahan Data Magnetik.....	20
3.5 Sistem Panas Bumi.....	23
3.6 Suhu Curie.....	28
IV. METODOLOGI PENELITIAN	
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	29
4.2 Alat dan Bahan.....	30
4.3 Prosedur Penelitian.....	30
V. HASIL PENGAMATAN DAN PEMBAHASAN	
5.1 Titik Pengukuran Data pada Daerah Penelitian.....	33
5.2 Pengolahan Data.....	34
5.3 Zona Panas Bumi.....	39
5.4 Pemodelan 2 Dimensi.....	42
5.5 Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi.....	47
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Kesimpulan.....	48
6.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel	
1. Nilai Suseptibilitas Batuan.....	18
2. Jadwal pelaksanaan Tugas Akhir.....	29
3. Data Geomagnetik Ijen.....	34
4. Nilai suseptibilitas benda pemodelan penampang A-A' dan penampang B-B'.....	44

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar	
1. Kolom Stratigrafi Jawa Timur.....	6
2. Peta Geologi Regional Gunung Ijen.....	11
3. Elemen medan magnet bumi.....	15
4. Model medan magnet induksi dan garis gaya medan magnet <i>remanent</i> pada wilayah <i>latitute intermediat</i>	16
5. Reduce to Pole.....	22
6. Sistem Panas Bumi.....	24
7. Diagram Alir.....	31
8. Peta Pesebaran Titik Pengukuran pada Daerah Penelitian.....	33
9. Kontur Anomali Magnetik Total.....	35
10. Kontur Anomali Magnetik Total setelah dilakukan RTP.....	36
11. Kontur Anomali a. Regional dan b. Residual Magnetik Daerah Penelitian.....	38
12. Kontur <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	39
13. Identifikasi Struktur secara Kualitatif.....	40
14. Zona Panas Bumi.....	41
15. a. lintasan A-A' dan b. lintasan B-B' pada Kontur Anomali Residual.....	42
16. Model 2 Dimensi Lintasan A-A'.....	45
17. Model 2 Dimensi Lintasan B-B'.....	46

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertemuan tiga lempeng besar yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Australia, Lempeng India, dan Lempeng Pasifik terletak di Kepulauan Indonesia, mengakibatkan tatanan tektonik yang kompleks di Indonesia. Penunjaman antara lempeng benua dan lempeng samudra menyebabkan magma mencair dalam bentuk *partial melting*. Diferensiasi terjadi di batuan mantel dan magma hingga mencapai permukaan, menyebabkan terbentuknya kantong magma yang berguna dalam pembentukan jalur vulkanik (*ring of fire*). Munculnya rangkaian gunung berapi Pasifik dan aktivitas tektonik di beberapa bagian Indonesia memberikan model konseptual untuk pembentukan sistem panas bumi Indonesia (Kasbani, 2009).

Energi yang tersimpan dalam bentuk air panas atau pun uap yang terbentuk pada kondisi geologi tertentu dan berada pada kedalaman beberapa kilometer dari permukaan bumi disebut sebagai sistem panas bumi. Sistem panas bumi terjadi proses konduksi di mana panas dipindahkan ke permukaan bumi. Adanya panas yang terkonsentrasi dalam sistem panas bumi dicirikan dengan anomali termal yang terlihat di permukaan dan yang ditandai dengan gradien suhu yang tinggi (Broto dkk., 2011).

Sistem panas bumi mempunyai suhu yang cukup tinggi, biasanya berada disepanjang zona vulkanik punggung pemekaran benua, di atas zona subduksi, dan berada pada anomali lelehan di dalam lempeng. Batas pertemuan antar lempeng-lempeng yang bergerak menjadi pusat lokasi terdapat sistem hidrotermal. Salah satu persyaratan utama dalam pembentukkan sistem panas

bumi (hidrotermal) yaitu mempunyai reservoir untuk mengakumulasi panas. Reservoir panas bumi yang produktif harus mempunyai porositas dan permeabilitas yang cukup tinggi, dengan ukuran yang besar, memiliki suhu tinggi dan terdapat kandungan fluida yang cukup. Hasil interaksi yang kompleks dari proses vulkano-tektonik aktif, stratigrafi yang lebih tua dan struktur geologi merupakan geometri reservoir hidrotermal pada daerah vulkanik. Potensi panas bumi di Indonesia dapat mencapai sekitar 28 GWe, sehingga menempatkan Indonesia menjadi salah satu negara terkaya akan potensi energi panas bumi (Kasbani, 2009).

Kompleks Gunung Ijen merupakan salah satu gunungapi Indonesia yang memiliki potensi panas bumi. Kompleks Gunung Ijen terdiri dari beberapa gunungapi yang tumbuh di sekitar dinding dan di dalam kaldera Ijen Tua. Gunung Ijen adalah salah satu gunungapi yang sampai saat ini masih aktif tumbuh di dalam Kaldera Gunung Ijen Tua, yang merupakan depresi vulkanik besar dengan diameter kurang lebih 16 kilometer berbentuk elips. Keunikan Kompleks Gunung Ijen dibandingkan dengan gunungapi lainnya di Indonesia yaitu memiliki model perpaduan gunungapi poligenetik dan monogenetik yang tumbuh di dalam dan pinggir kaldera. Selain itu Kompleks Gunung Ijen mempunyai air danau Kawah Ijen dengan derajat keasaman yang sangat tinggi (Zaennudin dkk., 2012). Sistem panas bumi Blawan - Ijen dikontrol oleh struktur lokal (vulkanik) serta struktur regional (tektonik). Blawan - Ijen masuk dalam daftar Penyiapan Wilayah Kerja (WKP) sebagai potensi panas bumi Indonesia (Kementerian ESDM, 2017). Blawan – Ijen diperkirakan memiliki sumberdaya hipotesis panas bumi sekitar 92 MWe dan potensi cadangan terbukti sebesar 185 MWe (Dewi dkk., 2015).

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode magnetik. Metode magnetik dapat digunakan untuk menganalisa reservoir panas bumi dari besarnya intensitas magnet suatu batuan yang ditentukan oleh faktor kerentanan (suseptibilitas) magnet (k) dari batuan tersebut. Faktor kerentanan atau suseptibilitas magnet (k) merupakan kemampuan suatu batuan dalam menerima sifat magnet dari medan magnet bumi. Kerentanan magnet (k) suatu batuan sebanding terhadap konsentrasi dari kelompok mineral magnetik

dalam batuan tersebut. Batuan yang sedikit atau tidak mengandung mineral magnetik, akan mempunyai intensitas magnet yang kecil. Sehingga untuk batuan yang telah mengalami ubahan (alterasi) atau pelapukan intensitasnya akan rendah (Afandi dkk., 2013). Pada penelitian ini akan diberikan gambaran tentang zona reservoir panas bumi berdasarkan pemodelan 2D magnetik yang berada di Gunung Ijen.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memetakan dan menentukan zona panas bumi Gunung Ijen berdasarkan sebaran nilai anomali magnetik.
2. Memperoleh sebaran nilai susceptibilitas Gunung Ijen berdasarkan model 2 Dimensi data magnetik.
3. Mengidentifikasi zona reservoir panas bumi berdasarkan sebaran nilai susceptibilitas.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah, penelitian yang dilakukan sampai analisis sebaran nilai susceptibilitas anomali magnetik dan model 2 dimensi anomali magnetik untuk menentukan zona reservoir panas bumi pada Gunung Ijen daerah Jawa Timur.

1.4 Manfaat

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah memberikan informasi tentang gambaran bawah permukaan dan zona reservoir panas bumi pada Gunung Ijen daerah Jawa Timur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Daerah Penelitian

Secara umum daerah penelitian terletak di Kabupaten Banyuwangi dan Kabupaten Bondowoso, Jawa Timur. Kompleks Kaldera Ijen terbentuk selama masa pleistosen di Pulau Jawa. Pra-kaldera terjadi pada $0.29 \text{ Ma} \pm 0.003$ terdiri dari bahan strato-vulkanik yang terbentuk akibat endapan aliran piroklastik, runtuh piroklastik, dan aliran lava yang dapat juga ditemukan pada bagian utara Kaldera Ijen. Kawah Ijen terletak di bagian selatan dari kompleks kaldera Ijen (Suparman dan Gunawan, 2019).

1. Fisiografi

Komplek Ijen termasuk dalam Zona Solo (*sensu lato*) merupakan suatu depresi (cekungan antara dua lajur pegunungan) memanjang di bagian tengah (median) Pulau Jawa. Zona Solo (*sensu lato*) dikelompokkan menjadi tiga bagian subzona dari yang paling utara hingga selatan sebagai berikut:

- a) Subzona Ngawi adalah lajur depresi yang berada diantara busur gunungapi yang sekarang dan Perbukitan Kendeng.
- b) Subzona Solo (*sensu stricto*) adalah lajur depresi yang berada diantara deretan gunungapi sekarang (*intermontane plains*).
- c) Subzona Blitar adalah lajur depresi yang berada diantara perbatasan Pegunungan Selatan dengan deretan gunungapi yang sekarang. Pembentukan Zona Blitar terjadi karena pengaruh tektonik Pegunungan Selatan (Gunung Kelud sampai Gunung Kawi).

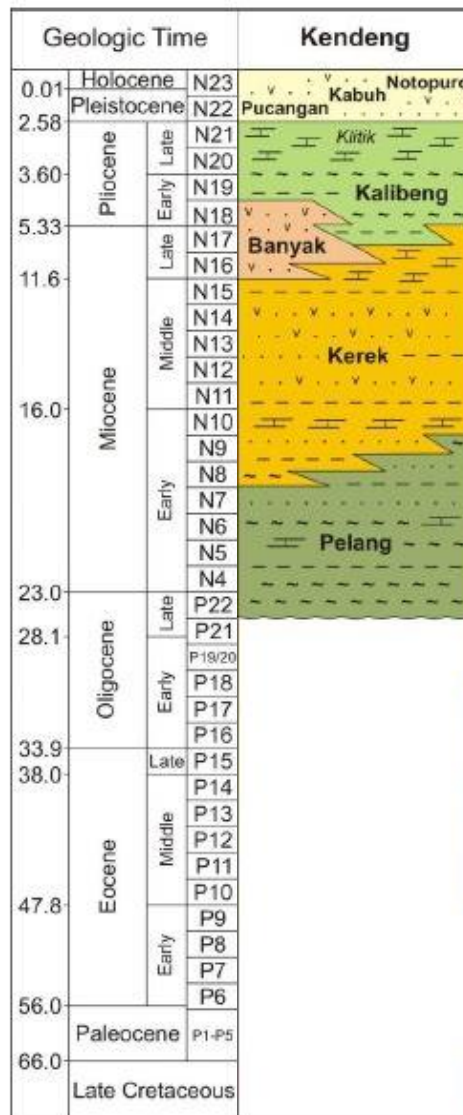
Zona Solo adalah cekungan sedimenter aktif yang memiliki sistem fluvial dengan menerima pasokan sedimen yang berasal dari busur gunungapi. Sungai Bengawan Solo, Sungai Bengawan Madiun (yang kemudian bergabung dengan Bengawan Solo di Kota Ngawi), dan Sungai Brantas adalah beberapa sungai besar yang mengalir melalui Zona Solo dan mengendapkan sedimennya di zona ini. Dimana sungai-sungai ini akhirnya membentuk delta-delta besar di bagian pesisir Surabaya dan Gresik (Husein dkk., 2016).

2. Stuktur Ijen

Beberapa patahan ditemukan di kaldera yang berada pada bagian kanan dari pusat kaldera. Terdapat kelurusan berbentuk melingkar di kaldera bagian utara dan runtuh dinding membentuk sungai yang curam. Sekitar 0.2-0.05 Ma terjadi letusan Plinia yang mengeluarkan 80 km^3 material vulkanik besar dan meninggalkan struktur kaldera yang sangat besar. Stuktur kaldera yang melingkar sekarang telah ditutupi oleh gunungapi muda yang berada di daerah selatan. Pada Kompleks Ijen ada beberapa struktur yang terbentuk akibat deformasi yaitu patahan Blawan, patahan Kawahwurung, patahan Krepekan, patahan Cemara - Kukusan, patahan Kalipahit - Banyulinu, patahan Djampit, patahan Rante, patahan Pawenan - Blau dan patahan Kendeng - Merapi. Deformasi ini kemungkinan disebabkan oleh aktivitas tektonik, pengisian ulang magma pada dapur magma, atau kolaborasi keduanya yang membentuk dasar kaldera (Daud dkk., 2018).

3. Stratigrafi Ijen

Zona depresi umumnya berada pada zona pegunungan atau perbukitan yang di dekatnya disebut sebagai Zona Solo. Stratigrafi Zona Solo menyerupai stratigrafi Zona Kendeng. Dimana penyusun stratigrafi Zona Kendeng adalah endapan laut dari dalam pada bagian bawah yang semakin ke atas berubah menjadi endapan laut yang dangkal yang berakhir menjadi endapan non laut. Endapan pada Zona Kendeng terdiri dari karbonat, endapan turbidit klastik dan vulkaniklastik. Kolom stratigrafi Gunung Ijen, Jawa Timur dapat dilihat pada **Gambar 1** di bawah ini.



Gambar 1. Kolom Stratigrafi Jawa Timur (Modifikasi dari Husein dkk., 2016)

1) Formasi Pelang

Formasi batuan ini diyakini sebagai yang tertua diantara formasi batuan di kawasan Mandala Kendeng. Formasi batuan itu tersingkap di Desa Pelang, Juwangi bagian Selatan. Tidak jelas bagian atas atau bawah dari formasi ini, karena singkapan daerah *upthrust* yang berbatasan langsung dengan formasi Kerek yang muda. Mulai dari bagian yang tersingkap yang memiliki ketebalan berkisar antara 85 meter hingga 125 meter. Litologi utama penyusunnya yaitu napal,

sejenis napal lempung dengan lensa kalkarenit bioklastik yang banyak mengandung fosil foraminifera besar.

2) Formasi Kerek

Formasi Kerek berupa perulangan bergantian dari batulempung, napal, batupasir tufa dan batupasir tufa, yang memiliki keunikan pada litologinya. Proses berulang ini menunjukkan struktur sedimen yang khas, yaitu lapisan bergradasi (*graded bedding*). Lokasi formasi ini terletak di Desa Kerek di sepanjang Sungai Solo sampai sepanjang ± 8 kilometer bagian utara Ngawi. Daerah disekitar tipe formasi ini dibagi menjadi tiga anggota, dari yang tua hingga ke muda yaitu:

a. Anggota Banyuurip

Anggota Banyuurip tersusun atas perselingan antara napal lempung, lempung dengan batupasir tufa gamping dan batupasir tufa yang memiliki ketebalan sekitar 270 meter. Pada bagian tengah dijumpai sisipan batupasir gamping dan tufa dengan ketebalan sekitar 5 meter, sedangkan pada bagian atas memiliki perlapisan kalkarenit pasir dengan ketebalan sekitar 5 meter dengan sisipan tufa halus. Anggota Banyuurip berada pada umur geologi miosen tengah.

b. Anggota Sentul

Anggota Sentul tersusun atas perselingan yang mirip dengan anggota Banyuurip, akan tetapi pada lapisan yang bertufa lebih tebal pada anggota ini. Anggota Sentul memiliki ketebalan yang mencapai 500 meter. Anggota Sentul berada pada umur geologi miosen atas.

c. Anggota Batugamping Kerek

Anggota Batugamping Kerek berada pada bagian atas dari formasi Kerek, yang tersusun atas perselingan antara batugamping tufa dengan perlapisan lempung dan tufa. Anggota ini memiliki ketebalan yang mencapai 150 meter. Anggota Batugamping Kerek berada pada umur geologi miosen atas bagian tengah.

3) Formasi Banyak

Formasi Banyak dapat dijumpai hanya pada daerah Kendeng bagian barat, dimana paling tebal berada disekitar Ungaran. Formasi ini

tersusun atas perselingan antara tufa, batupasir tufa, breksi tufa gamping, breksi vulkanik, dan napal tufa yang memiliki banyak kandungan *globigerina*, sedangkan komposisi batuan vulkaniknya yaitu andesit. Struktur sedimen yang ada pada formasi ini berupa lapisan bersusun (*graded bedding*) dan laminasi paralel, yang menunjukkan adanya arus *turbid*. Formasi ini memiliki hubungan dengan Formasi Kerek dimana pada bagian bawahnya selaras, dan memiliki hubungan yang bersilang jari dengan Formasi Kalibeng. Formasi ini berada pada umur geologi miosen atas. Hal ini berdasarkan kandungan foraminifera plankton, dengan lingkungan sedimentasi neritik luar.

4) Formasi Kalibeng

Formasi Kalibeng dikelompokkan menjadi dua bagian diantaranya formasi bagian bawah dan formasi bagian atas:

a. Formasi Kalibeng bagian bawah

Pada Formasi Kalibeng bagian bawah tersusun atas napal tak berlapis yang memiliki ketebalan sekitar 600 meter memiliki warna putih kekuning-kuningan sampai abu-abu kebiru-biruan, banyak mengandung foraminifera planktonik. Di sekitar Gunung Pandan ke arah timur, pada bagian atas formasi ini terdapat endapan vulkanik laut yang menunjukkan struktur turbidit, dapat disebut sebagai Anggota Atasangin.

b. Formasi Kalibeng bagian atas

Pada Formasi Kalibeng bagian atas memiliki umur geologi pada masa pliosen. Formasi ini tersusun awalnya dari Anggota Klitik yang memiliki kandungan kalkarenit putih kekuning-kuningan, lunak, mengandung foraminifera planktonik, moluska, koral, algae dan bersifat napal atau pasir dengan perlapisan yang baik. Bagian paling atas dari formasi ini tersusun dari breksi dengan fragmen gamping berukuran kerikil dan semen karbonat. Selanjutnya pada endapan napal pasir, pada perlapisan keatas napalnya bersifat semakin lempung. Bagian teratas ditempati oleh lempung berwarna hijau kebiru-biruan.

Formasi ini ditemukan sepanjang lipatan bagian selatan antiklinorium Kendeng yang memiliki ketebalan sekitar 27 meter sampai 589 meter.

5) Formasi Pucangan

Formasi Pucangan tersebar cukup luas dari Daerah Sangiran formasi ini berkembang sebagai fasies vulkanik dan fasies lempung hitam. Fasies vulkaniknya merupakan endapan lahar yang berada diatas Formasi Kalibeng. Fasies lempung hitamnya merupakan fasies laut, air payau hingga air tawar. Pada bagian bawah dari lempung hitam, sering terdapat fosil diatomeae dengan sisipan lapisan tipis yang mengandung foraminifera bentonik penciri laut dangkal. Semakin ke atas pada formasi ini menunjukkan kondisi pengendapan air tawar yang dicirikan dengan adanya fosil moluska yang merupakan penciri air tawar.

6) Formasi Kabuh

Formasi Kabuh memiliki tempat yang berada di Desa Kabuh, Kecamatan Kabuh, Jombang. Formasi ini tersusun dari batupasir dengan material non vulkanik seperti kuarsa, berstruktur silang siur dengan sisipan konglomerat yang mengandung moluska air tawar dan fosil-fosil vertebrata. Pada daerah Kendeng bagian barat formasi ini tersingkap di kubah Sangiran sebagai batupasir silang siur dengan sisipan konglomerat dan tufa yang memiliki ketebalan sekitar 100 meter. Batuan ini terendapkan fluvial dimana terdapat struktur silang siur yang merupakan endapan danau karena dijumpai moluska air tawar seperti yang dijumpai di Trinil.

7) Formasi Notopuro

Formasi Notopuro terdapat di Desa Notopuro, timurlaut Saradan, Madiun yang saat ini telah dijadikan waduk. Formasi ini terdiri dari batuan tufa yang berselingan dengan batupasir tufa, breksi lahar dan konglomerat vulkanik. Semakin ke atas sisipan batupasir tufa semakin banyak ditemukan. Sisipan breksi volkanik dengan fragmen kerakal pada formasi ini terdiri atas andesit dan batuapung juga merupakan ciri dari formasi ini. Formasi ini terendapkan secara selaras di atas formasi Kabuh, terdapat disepanjang Pegunungan Kendeng yang memiliki

ketebalan lebih dari 240 meter. Umur geologi dari formasi ini adalah Plistosen Akhir dan merupakan endapan lahar di daratan.

8) Endapan Undak Bengawan Solo

Endapan Undak Bengawan Solo terdiri atas konglomerat polimik dengan fragmen napal dan andesit berdampingan dengan endapan batupasir yang mengandung fosil-fosil vertebrata. Pada Daerah Brangkal dan Daerah Sangiran terdapat endapan undak yang tersingkap sebagai konglomerat dan batupasir andesit yang sedikit terkonsolidasi dan terletak di atas bidang erosi pada Formasi Kabuh maupun Formasi Notopuro (Husein dkk., 2016).

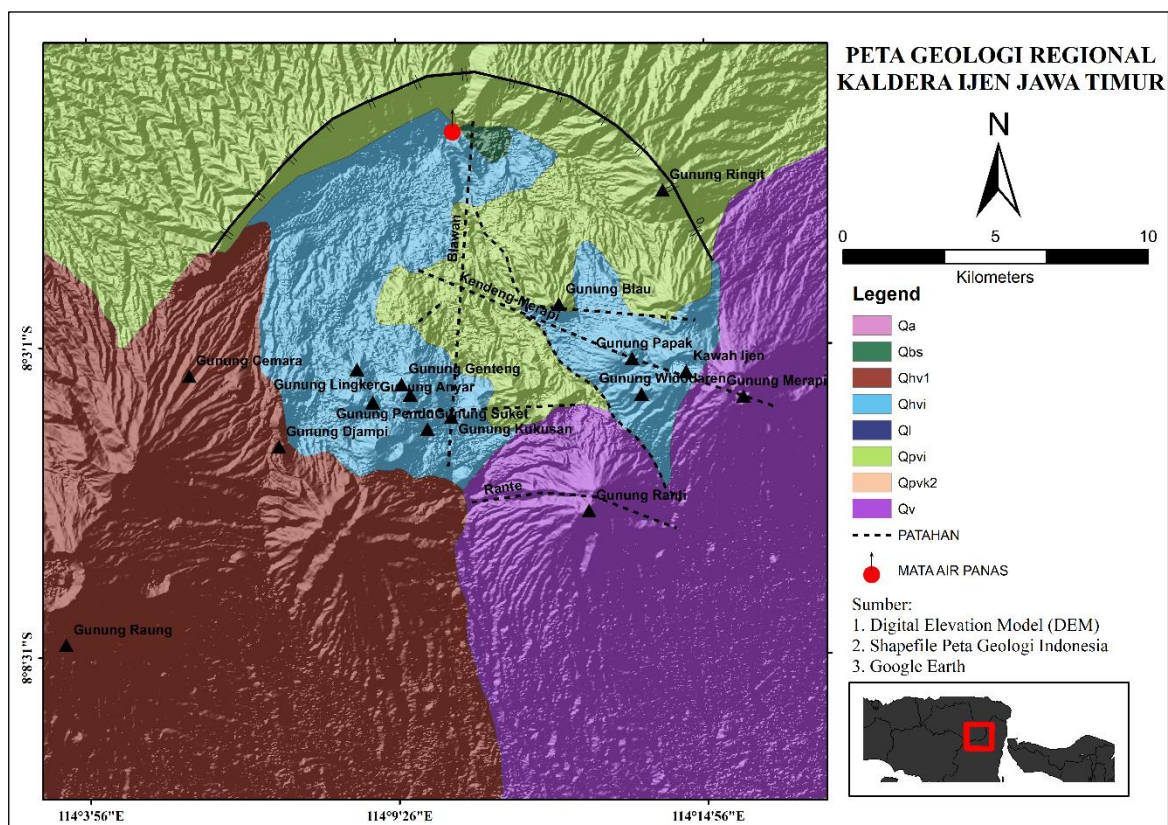
4. Geologi Batuan

Secara geologi, kenampakan topografi daerah Blawan-Ijen dikontrol oleh struktur melingkar (*rim structure*) dengan pusat-pusat erupsi baru yang penyebarannya juga melingkar, dimana pada bagian dinding kaldera sebelah utara masih terlihat jelas. Tidak jelasnya kenampakan dinding kaldera sebelah timur, barat dan selatan disebabkan karena telah ditutupi oleh produk vulkanik muda yang baru dan berbentuk kerucut (Kementerian ESDM, 2017).

Daerah penelitian mencakup 8 formasi batuan yaitu Aluvium (Qa), Endapan Danau Blawan (Qbs), Batuan Gunungapi Ijen Tua (Qhvl), Batuan Gunungapi Ijen Muda (Qhvi), Batugamping Terumbu (Ql), Batuan Gunungapi Ijen Tua (Qpvi), Formasi Kalibaru (Qpvk2), dan Batuan Gunungapi Muda (Qv). Tiap formasi batuan tersusun atas:

- Aluvium (Qa) tersusun dari krakal, pasir, lanau dan lempung.
- Endapan Danau Blawan (Qbs) tersusun dari lempung tufan.
- Batuan Gunungapi Ijen Tua (Qhvl dan Qpvi) tersusun dari breksi gunungapi, breksi batuapung, tuff dan lava basal.
- Batuan Gunungapi Ijen Muda (Qhvi) tersusun dari tuff, breksi gunungapi, lava dan belerang.
- Batugamping Terumbu (Ql) tersusun dari batugamping terumbu, tuff, dan aglomerat.

- Formasi Kalibaru (Qpvk2) tersusun dari breksi lahar, konglomerat, batupasir tufan dan tuff.
- Terakhir Batuan Gunungapi Muda (Qv) tersusun dari breksi tuff dan batuan beku. Kemunculan produk vulkanik muda dan geologi daerah penelitian ini ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Gunung Ijen

2.2 Penelitian Terdahulu

Pada jurnal - jurnal ilmiah sudah banyak ditemukan penelitian tentang panas bumi pada Kompleks Gunung Ijen yang menjadi target pada penelitian ini. Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam pembuatan laporan penelitian ini. Beberapa referensi yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan metode-metode geofisika seperti Metode Magnetik, Metode Pengindraan Jauh, dan Metode Magnetotelurik.

Menurut Sukojo dan Mardiana (2017), wilayah Gunung Ijen teridentifikasi memiliki potensi panas bumi yang sangat tinggi. Hal ini berdasarkan pengolahan dengan Data Citra Lansat 8 pada rentang waktu Januari, Mei dan Agustus 2016. Lokasi dari potensi panas bumi yang tinggi ini seluas 39,43 hektar berada di Kecamatan Wongsorejo dan berdekatan dengan Kecamatan Sempol. Daerah ini memiliki suhu tinggi pada permukaan yang tinggi. Selain itu memiliki indeks vegetasi rendah dan berada dalam tutupan lahan berupa rumput, kawah, dan pemukiman.

Menurut Daud dkk. (2018), anomali magnetik tinggi didistribusikan di batas area Ijen, sementara anomali magnetik rendah diamati di pusat area penelitian. Beberapa manifestasi termal permukaan ditemukan pada wilayah geotermal Ijen yang merupakan sistem panas bumi bersuhu tinggi, seperti batuan alterasi di dekat Gunung Kukusan dan sekelompok *hotspring* Blawan di bagian utara kaldera. Anomali rendah menunjukkan batuan demagnetisasi yang mungkin disebabkan oleh aktivitas hidrotermal. Dengan demikian, anomali magnetik yang rendah juga menghadirkan kemungkinan reservoir panas bumi di daerah geotermal Ijen. Korelasi yang baik juga terbentuk dengan deformasi permukaan yang diamati dekat dengan Gunung Kukusan serta reservoir suhu tinggi yang dibor di pusat kaldera. Persimpangan beberapa patahan seperti: patahan Blawan, patahan Cemara-Kukusan dan patahan Kawahwurung di pusat area penelitian mendukung kemungkinan lokasi zona prospek panas bumi.

Menurut Suparman dan Gunawan (2019), variasi struktur indeks yang diperoleh dari penelitian pada daerah Kompleks Gunung Ijen menunjukkan nilai 0.002 sampai 1.39 yang menginterpretasikan adanya *fault*, *contact*/*thin sheet* dan *dyke*. Berdasarkan pemodelan 3 Dimensi Euler Dekonvolusi yang telah dilakukan, mengestimasi adanya sumber anomali magnetik di bawah air panas Blawan dan Kawah Werung yang mempunyai kedalaman yang mirip antara keduanya yaitu sekitar 1.5 kilometer di bawah permukaan bumi, dengan sumbernya berada di bawah Merapi dan Rantih. Lokasi sumber berada pada kedalaman kurang dari 1 kilometer dari Kawah Ijen dan terhubung dengan Merapi, Rantih, dan Jampit. Pemodelan inversi magnetik juga dilakukan pada

penelitian ini yang menunjukkan profil anomali magnetik di bawah Kawah Ijen memiliki kontras susceptibilitas anomali magnetik sampai kedalaman 1 kilometer dan semakin ke bawah memiliki bagian yang semakin curam. Diinterpretasikan bahwa itu adalah *dyke* atau saluran Kawah Ijen yang kemungkinan merupakan *heat source* anomali magnetik pada area di bawah Kawah Ijen.

Menurut Dewi dkk. (2015), sistem panas bumi pada Daerah Ijen menunjukkan adanya komponen sistem panas bumi yang lengkap. Sistem panas bumi pada penelitian ini tersusun atas zona lapisan penudung berada pada nilai <32 ohm meter, zona reservoir berada pada nilai >32 ohm meter sampai <512 ohm meter, dan zona sumber panas berada pada nilai >512 ohm meter yang didukung dengan adanya patahan. Patahan pada daerah penelitian diduga sebagai jalur migrasi fluida dari dalam reservoir menuju permukaan yang merupakan indikasi adanya aktivitas hidrotermal.

Menurut Daud dkk. (2017), sistem panas bumi pada daerah Banyuwangi dan Bondowoso kemungkinan berasosiasi dengan Kaldera Kendeng. Dimana Kaldera Kendeng memiliki diameter sekitar 15 kilometer. Manifestasi permukaan ditemukan dibagian utara dari tepi kaldera dalam area Blawan yang mencakup mata air panas bikarbonat. Selain itu manifestasi permukaan lainnya seperti Kawah Ijen dengan kandungan solfatara yang tinggi mencapai pH dibawah 0.3. Hasil pemodelan 3 Dimensi data magnetotelurik memperoleh struktur geologi yang menunjukkan adanya zona *upflow*. Diperkirakan area prospek panas bumi pada penelitian ini berada di tengah (*center*) dari area survei. *Clay cap* yang impermeabel ditemukan di bagian timur dari area prospek. Pada area prospek sudah dilakukan *drilling* sampai kedalaman 2000 meter dengan suhu yang mencapai 283°C dan diketahui fluida netral berada dalam area panas bumi Blawan-Ijen. Reservoir pada area prospek memiliki temperatur 200°C pada kedalaman 1400 meter. Temperatur tinggi yang berasosiasi dengan mineral ditemukan juga pada kedalaman 1782 meter sampai 2000 meter.

III. TEORI DASAR

3.1 Metode Magnetik

Metode geofisika digunakan sebagai pendeteksi perbedaan tentang sifat fisis didalam bumi. Kemagnetan, kepadatan, dan tahanan jenis merupakan sifat fisis yang paling umum untuk mengukur penelitian kegeofisikaan yang memungkinkan adanya perbedaan di dalam bumi untuk mentafsirkan yang berhubungan dengan struktur mengenai lapisan tanah, berat jenis batuan, rembesan isi air, dan mutu air (Todd, 1959).

Gaya magnetik berbanding terbalik terhadap kuadrat jarak antara dua muatan magnetik, yang persamaannya menyerupai hukum gaya gravitasi Newton. Jadi, jika kedua buah kutub P_1 dan kutub P_2 yang berasal dari monopol magnetik yang terpisah dengan jarak r , maka persamaan gaya magnetik dinyatakan seperti berikut:

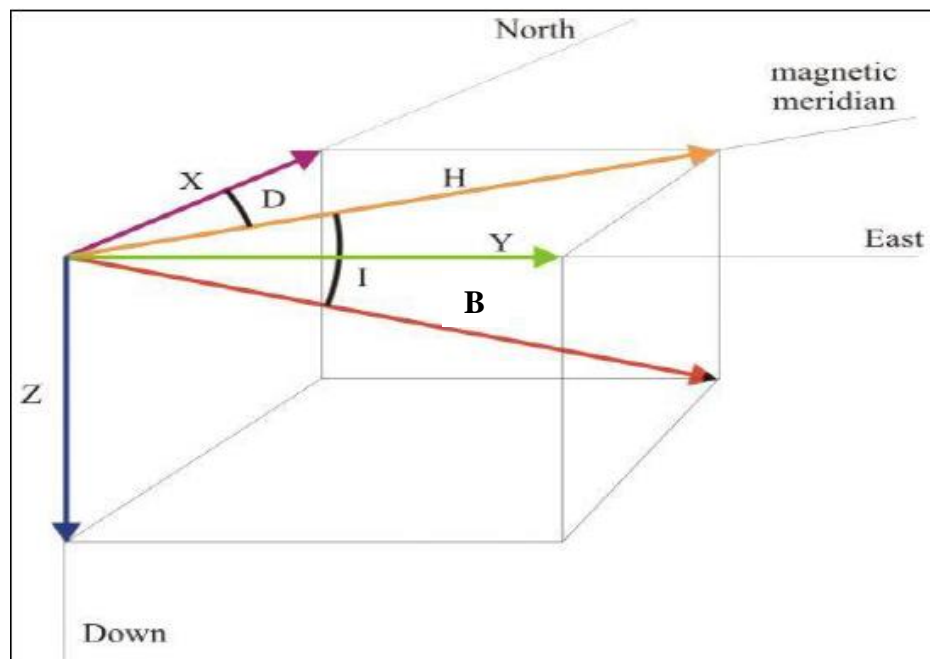
$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2} \vec{r} \dots\dots\dots(1)$$

dimana, \vec{F}_m merupakan gaya magnetik *monopol* pada kutub P_1 dan P_2 , \vec{r} merupakan vektor satuan yang ber-arah dari kutub P_1 ke kutub P_2 , P merupakan muatan kutub 1 dan kutub 2 monopol, μ merupakan permeabilitas medium magnetik (untuk ruang hampa $\mu = 1$) (Sheriff, 1989).

3.2 Medan Magnet Bumi

Medan magnet bumi terkarakterisasi oleh parameter fisis atau dapat disebut sebagai elemen medan magnet bumi, yang diukur meliputi arah dan intensitas kemagnetannya. Parameter fisis ini terdiri dari (**Gambar 3**):

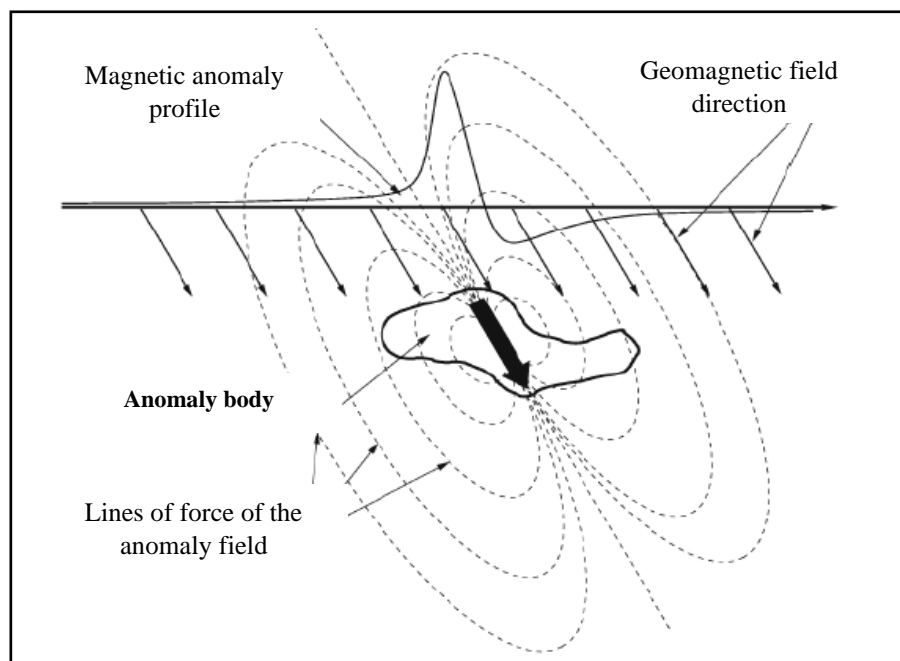
1. Deklinasi (D), merupakan sudut antara komponen horizontal dengan utara magnetik yang dihitung dari utara magnetik ke arah timur.
2. Inklinasi (I), merupakan sudut yang berada diantara bidang horizontal dengan medan magnetik total yang terhitung mulai dari bidang horizontal menuju bidang vertikal ke bawah.
3. Intensitas Horizontal (H), merupakan besar dari medan magnetik total pada bidang horizontal.
4. Medan magnetik total (B), merupakan besar dari vektor medan magnetik total (Blakely, 1995).



Gambar 3. Elemen medan magnet bumi (Modifikasi dari Reynold, 1995)

Medan magnet bumi dibagi menjadi 3 bagian yaitu medan magnet utama (*main field*), medan magnet luar (*external field*), dan medan magnet anomali (*crustal field*). Medan magnet utama (*main field*) merupakan medan rata-rata hasil dari pengukuran dalam jangka waktu yang cukup lama dengan daerah yang luas lebih yaitu dari 10^6 km². Medan magnet luar (*external field*) merupakan pengaruh dari luar bumi pada atmosfer sebagai hasil dari ionisasi yang timbul akibat sinar ultraviolet matahari. Sumber medan luar ini berhubungan dengan arus listrik yang mengalir dalam lapisan yang terionisasi

di atmosfer, mengakibatkan perubahan pada medan ini terhadap waktu jauh lebih cepat. Medan magnet anomali (*crustal field*) merupakan batuan yang berasal dari hasil mineral yang mengandung magnet misalnya seperti *magnetite*, *titanomagnetit* dan lain-lain yang terletak di kerak bumi. Survei metode magnetik yang dilakukan pada penelitian, variasi medan magnetik yang terukur pada permukaan (anomali magnetik) menjadi target pengukuran. Secara umum anomali medan magnetik dipengaruhi oleh medan magnetik remanen dan medan magnetik induksi. Medan magnet remanen memiliki pengaruh yang besar terhadap magnetisasi batuan yang merupakan besar dan arah medan magnetiknya juga berhubungan dengan peristiwa kemagnetan sebelumnya sehingga sangat sulit untuk diamati. Anomali yang diperoleh dari survei adalah hasil gabungan dari medan magnetik remanen dan medan magnetik induksi, jika arah dari medan magnet remanen sama dengan arah medan magnet induksi maka anomalnya bertambah besar, begitu pula sebaliknya yang dapat dilihat pada **Gambar 4** (Telford dkk., 1996).



Gambar 4. Model medan magnet induksi dan garis gaya medan magnet *remanent* pada wilayah *latitute intermediat* (Modifikasi dari Lanza dan Meloni, 2006).

3.3 Suseptibilitas Batuan

Suseptibilitas adalah derajat kemagnetan suatu bahan atau material dalam respon terhadap pengaruh medan magnet luar. Suseptibilitas magnet dilambangkan dengan simbol k yang dihasilkan dari hubungan:

$$k = \frac{I}{H} \dots\dots\dots(2)$$

dimana, I adalah intensitas magnet (A/m), H adalah kuat medan magnet bumi dengan nilai 0,6 Gauss = $0,6 \times 10^3$ A/m, dan k adalah suseptibilitas magnet.

Harga suseptibilitas (k) sangat penting dalam pencarian benda anomali magnetik karena untuk setiap jenis mineral dan batuan yang berbeda memiliki sifat ferromagnetik berbeda antara satu dengan lainnya. Nilai (k) pada batuan semakin besar jika dalam suatu batuan memiliki mineral-mineral yang bersifat magnetik cukup banyak. Berdasarkan nilai (k) dibagi menjadi kelompok-kelompok menurut jenis material dan batuan penyusun litologinya, yaitu:

1. Diamagnetik

Material diamagnetik mempunyai harga suseptibilitas magnetik (k) *negative* dan sangat kecil. Ini berarti orientasi elektron orbital selalu memiliki arah yang berlawanan dengan medan magnet luar pada substansi ini. Hal ini terjadi karena atom-atom pembentuk material pada batuan diamagnetik, setiap elektron yang saling berpasangan memiliki spin yang arahnya berlawanan pada tiap pasangan. Jika ditemui medan magnet luar, maka elektron akan berpresisi dan membentuk medan magnet yang lemah yang arahnya melawan medan magnet luar.

2. Paramagnetik

Material paramagnetik memiliki elektron yang putarannya tidak berpasangan dan mengarah pada arah putaran yang sama sehingga kulit elektron terluar pada material ini belum jenuh. Putaran berpresisi pada medan magnet luar sehingga menghasilkan medan magnet yang mengarah searah dengan medan tersebut, akibatnya memperkuat medan magnet itu. Tetapi momen magnetik yang terbentuk akibat

terorientasi acak oleh agitasi termal, menyebabkan bahan tersebut dapat dikatakan mempunyai sifat :

- a. Suseptibilitas k positif dan sedikit lebih besar dari satu.
- b. Suseptibilitas k bergantung pada temperatur.

3. Ferromagnetik

Material ferromagnetik memiliki kulit elektron yang hanya diisi oleh suatu elektron, sehingga terinduksi lebih mudah oleh medan luar. Keadaan ini semakin diyakinkan karena terdapat kelompok-kelompok bahan berspin yang memiliki arah sama sehingga membentuk *dipole-dipole* magnet (*domain*) dengan arah yang sama, jadi dalam medan magnet luar mempunyai sifat sebagai berikut:

- a. Suseptibilitas k positif dan jauh lebih besar dari satu.
- b. Suseptibilitas k bergantung dari temperatur.

Ferromagnetik dibagi menjadi dua, yaitu antiferromagnetik dan ferrimagnetik. Pada bahan antiferromagnetik domain-domain tadi menghasilkan *dipole* magnetik dengan arah yang saling berlawanan menyebabkan momen magnetik secara keseluruhan sangat kecil. Bahan antiferromagnetik yang mengalami kerusakan kristal maka akan mengalami medan magnet kecil dan memiliki suseptibilitas seperti pada bahan paramagnetik, tetapi harganya naik sampai dengan titik *curie* yang kemudian turun lagi menurut hukum *curie-weiss*. Pada bahan ferromagnetik domain-domain yang saling antiparalel tetapi memiliki jumlah *dipole* dengan arah tidak sama, sehingga mempunyai resultan magnetisasi yang masih cukup besar. Suseptibilitasnya tinggi dan bergantung pada temperatur (Telford dkk., 1996). Nilai suseptibilitas ditampilkan seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Nilai Suseptibilitas Batuan (Telford dkk., 1996)

Mineral or Rock Type	Susceptibility x 10 ⁻³ (SI)	
	Range	Average
Sedimentary		
Dolomite	0 – 0.9	0.1
Limestone	0 – 3	0.3

Mineral or Rock Type	Susceptibility x 10 ⁻³ (SI)	
	Range	Average
Sandstone	0 – 20	0.4
Shales	0.01 – 15	0.6
Average 48 Sedimentary	0 – 18	0.9
Metamorphic		
Amphibolite		0.7
Schist	0.3 – 3	1.4
Phyllite		1.5
Gneiss	0.1 – 25	
Quartzite		4
Serpentine	3 – 17	
Slate	0 – 35	6
Average 61 Metamorphic	0 - 70	4.2
Igneous		
Granite	0 – 50	2.5
Rhyolite	0.2 – 35	
Dolorite	1 – 35	17
Augite-syenite	30 – 40	
Olivine-diabase		25
Diabase	1 – 160	55
Porphyry	0.3 – 200	60
Gabbro	1 – 90	70
Basalts	00.2 – 175	70
Diorite	0.6 – 120	85
Pyroxenite		125
Peridotite	90 – 200	150
Andesite		160
Average for acid igneous	0 – 80	8
Average for basic igneous	0.5 – 97	25
Minerals		
Graphite		0.1
Quartz		-0.01
Rock salt		-0.01
Anhydrite, Gypsum		-0.01
Calcite	-0.001 – -0.01	
Coal		0.02
Clays		0.2
Chalcopyrite		0.4
Sphalerite		0.7
Cassiterite		0.9

Mineral or Rock Type	Susceptibility x 10 ⁻³ (SI)	
	Range	Average
Siderite	1 – 4	
Pyrite	0.005 – 5	1.5
Limonite		2.5
Arsenopyrite		3
Hematite	0.5 – 35	6.5
Chromite	3 – 110	7
Franklinite		430
Pyrrhotite	1 – 6000	1500
Ilmenite	300 – 3500	1800
Magnetite	1200 – 19200	6000

3.4 Pengolahan Data Magnetik

Dalam memperoleh nilai anomali magnetik maka diperlukan koreksi terhadap medan magnetik total hasil dari pengukuran pada tiap titik lokasi pengukuran yang mencakup koreksi harian, koreksi IGRF dan koreksi topografi. Koreksi harian (*diurnal correction*) adalah penyimpangan yang terjadi pada nilai magnetik bumi sebagai akibat dari adanya perbedaan waktu pada saat melakukan pengukuran data magnetik disetiap titik lokasi pengukuran dan akibat efek dari radiasi matahari dalam satu hari. Jika variasi harian memiliki nilai yang negatif, maka koreksi harian dilakukan dengan menambahkan nilai dari variasi harian yang terekam pada saat waktu tertentu terhadap data magnetik yang akan dilakukan koreksi. Tetapi jika variasi harian memiliki nilai yang positif, maka koreksi harian dilakukan dengan mengurangi nilai dari variasi harian yang terekam pada saat waktu tertentu terhadap data magnetik yang akan dilakukam koreksi. Dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\Delta H = H_{total} \pm \Delta H_{harian} \dots \dots \dots (3)$$

Koreksi IGRF merupakan nilai pada medan magnetik utama bumi, biasanya pada data hasil pengukuran merupakan nilai dari medan magnetik utama bumi, medan magnetik luar dan medan anomali magnetik. Apabila nilai dari medan magnetik utama direduksi dengan koreksi harian, maka kontribusi

dari medan magnetik utama direduksi dengan melakukan koreksi IGRF. Koreksi IGRF dilakukan dengan mengurangi nilai IGRF terhadap nilai medan magnetik total yang telah dilakukan koreksi harian terlebih dahulu pada setiap titik pengukuran sesuai dengan posisi geografis. Persamaan koreksinya (setelah dikoreksi harian) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta H = H_{total} \pm \Delta H_{harian} \pm H_0 \dots\dots\dots(4)$$

dimana $H_0 = IGRF$.

Koreksi topografi dilakukan jika terdapat pengaruh topografi dalam survei sangat kuat. Koreksi ini dalam survei geomagnetik masih tidak memiliki aturan yang jelas, tetapi salah satu metode yang digunakan dalam menentukan nilai koreksinya yaitu dengan membuat suatu model topografi dengan menggunakan model beberapa prisma segiempat (Suryanto, 1988).

Anomali medan magnetik secara garis besar diakibatkan oleh medan magnetik remanen dan medan magnetik induksi. Medan magnet remanen memiliki peranan yang besar terhadap magnetisasi batuan, dimana besar dan arah medan magnetik batuan dipengaruhi medan magnet remanen. Medan magnet remanen sangat sulit untuk diamati karena berkaitan juga dengan kejadian kemagnetan sebelumnya. Anomali yang diperoleh dari survei geomagnetik adalah hasil dari campuran medan magnetik remanen dan medan magnetik induksi. Apabila arah medan magnet remanen memiliki arah yang sama dengan medan magnet induksi maka anomali magnetik menjadi bertambah besar. Apabila arah medan magnetik remanen berbeda dengan arah medan magnet induksi maka anomali magnetik menjadi lebih kecil. Dalam survei geomagnetik, apabila anomali medan magnetik kurang dari 25% medan magnet utama bumi maka efek dari medan remanen akan diabaikan, sehingga dalam pengukuran medan magnet berlaku persamaan :

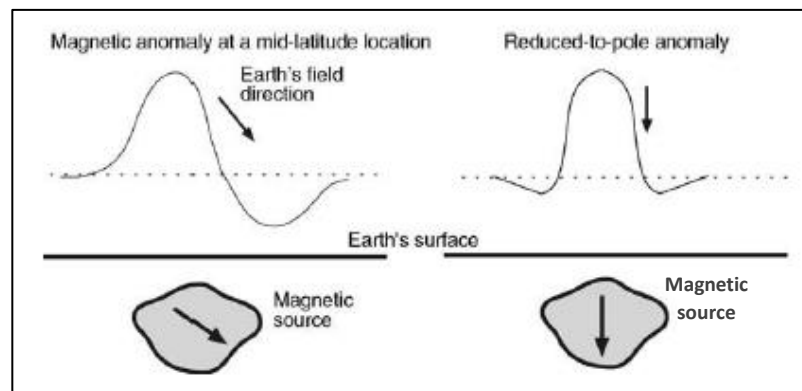
$$\Delta T = T_{obs} - T_{IGRF} - T_{VH} \dots\dots\dots(5)$$

dimana, ΔT adalah anomali medan magnet total, T_{obs} adalah harga medan magnet terukur, T_{IGRF} adalah medan magnet utama bumi, T_{VH} adalah medan magnet akibat variasi harian (koreksi diurnal).

Bentuk medan magnet anomali yang ditimbulkan oleh benda penyebabnya berdasarkan sifat medan magnet bumi dan sifat kemagnetan bahan pembentuk batuan, maka akan tergantung pada:

1. Inklinasi medan magnet bumi yang berada di sekitar benda penyebab.
2. Geometri yang berasal dari benda penyebab.
3. Kecenderungan arah *dipole-dipole* magnet di dalam benda penyebab.
4. Orientasi arah *dipole-dipole* magnet benda penyebab terhadap arah medan bumi (Telford dkk., 1996).

Dalam pengolahan data magnetik terdapat beberapa *filtering*, salah satunya Reduksi ke Kutub (*Reduction to Pole*) dan Pengangkatan ke Atas (*Upward Continuation*). Reduksi ke Kutub (*Reduction to Pole*) menampilkan anomali *dipole* (positif dan negatif) yang akan diubah menjadi anomali *monopole* (positif). Filter ini akan mengubah nilai inklinasi yang sebenarnya menjadi ke arah vertikal. Hal ini perlu dilakukan karena terdapat arah kemagnetan dan adanya variasi inklinasi dan deklinasi yang menyebabkan nilai anomali magnet bergeser dari sumber anomali sehingga menyulitkan dalam menginterpretasi anomali magnet (Irsyad dkk., 2018). Seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5** di bawah ini.



Gambar 5. *Reduce to Pole* (Ravat, 2007)

Pengangkatan ke atas (*upward continuation*) adalah salah satu proses transformasi pada data medan potensial ke bidang datar yang lebih tinggi dari suatu bidang datar. Proses ini pada pengolahan data geomagnetik memiliki fungsi sebagai filter tapis rendah untuk menghilangkan efek dari magnetik

lokal yang berada tersebar di permukaan topografi yang tidak memiliki hubungan dengan survei terbentuk dari berbagai sumber benda magnetik. Saat melakukan proses pengangkatan ke atas tidak disarankan untuk mengambil nilai yang terlalu tinggi karena dapat menghilangkan anomali magnetik lokal yang bersumber dari benda magnetik atau struktur geologi yang menjadi target survei (Blakely, 1995).

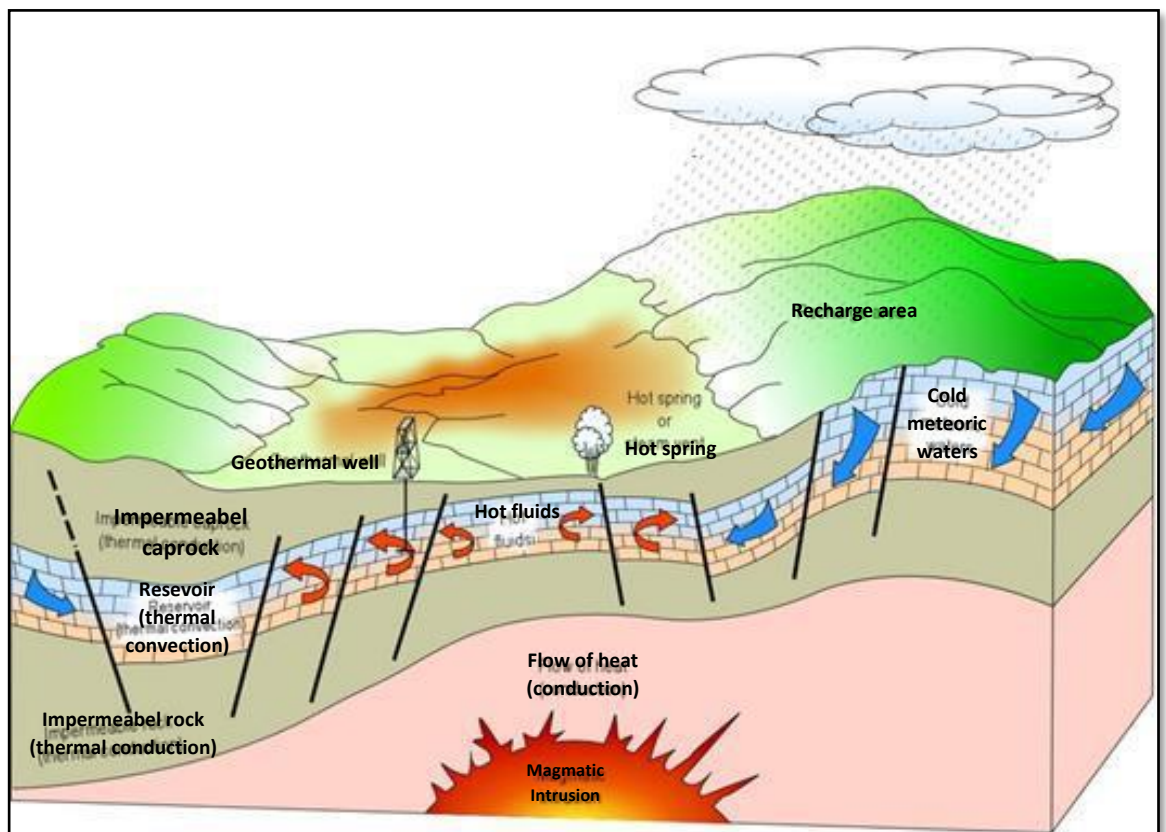
3.5 Sistem Panas Bumi

Panas bumi (*geothermal*) merupakan sumber daya alam berupa air panas atau uap yang terbentuk di dalam reservoir bumi melalui proses pemanasan air dibawah permukaan oleh batuan panas (Sihombing dkk, 2018). Sistem panas bumi kebanyakan berasosiasi dengan sistem vulkanik yang berada disepanjang busur kepulauan sebagai akibat dari pergerakan lempeng pada permukaan bumi sehingga menyebabkan terbentuknya gunungapi. Pada sistem panas bumi sumber panas memiliki peranan yang sangat penting, sehingga tidak hanya gunungapi aktif yang dapat dimanfaatkan untuk panas bumi tetapi juga gunungapi tua yang masih memiliki sumber panas yang cukup untuk sistem panas bumi, yang biasanya terletak pada wilayah *ring of fire* dapat dimanfaatkan (Rizkiani dkk, 2019).

Pembentukan sistem panas bumi (hidrotermal) memiliki persyaratan utama yaitu memiliki sumber panas yang besar (*heat source*), memiliki reservoir untuk mengakumulasi panas, dan memiliki lapisan penudung untuk terakumulasinya panas (*cap rock*) (Kasbani, 2009). Menurut Suharno (2012) persyaratan suatu sistem panas bumi akan sempurna jika memenuhi beberapa hal berikut (dapat dilihat pada **Gambar 6**):

1. Memiliki sumber panas (*heat source*) berupa batuan plutonik, magma yang telah dingin. Panas pada sumber dapat berpindah secara konduksi maupun konveksi. Busur vulkanik, *plume*, pelelehan *subcrustal* oleh *underplating*, pemekaran kerak, atau dari akibat deformasi plastis merupakan sumber yang menjadi transfer panas dari kerak (Kasbani, 2009).

2. Memiliki batuan yang berongga (*porous rocks*) atau reservoir tempat air panas atau uap panas untuk terjebak didalamnya. Menurut Kasbani (2009) porositas dan permeabilitas yang tinggi, ukuran yang cukup besar, temperatur yang tinggi dan kandungan fluida yang cukup harus dimiliki oleh reservoir panasbumi yang produktif. Geometri reservoir hidrotermal pada daerah vulkanik adalah hasil dari interaksi vulkano-tektonik aktif yang memiliki proses kompleks misalnya seperti stratigrafi yang lebih tua dan struktur geologi.
3. Terdapat struktur geologi (patahan, perlipatan, *collapse*, rekahan dan ketidak selarasan), yang merupakan sistem lolos air (*permeable*).
4. Memiliki lapisan penutup (*capsrock*) berupa batuan kedap air (*impermeable*) untuk menutupi reservoir sehingga mencegah jalan keluar akumulasi fluida panas dalam reservoir, biasanya terdiri dari batuan lempung. Pada lingkungan vulkanik yang berasosiasi dengan pergerakan tektonik biasanya menyebabkan terbentuknya celah. Batuan penutup (*impermeable*) tanpa celah yang ideal seharusnya jarang ditemukan, akan tetapi proses geokimia bisa menyebabkan terjadinya ubahan-ubahan hidrotermal. Dalam menutup celah-celah yang terbentuk deposisi mineral memiliki peran yang cukup penting, misalnya kalsit dan silika yang berperan sebagai penyegel celah-celah tersebut (Kasbani, 2009).
5. Terdapat daerah resapan air dan siklus hidrologi, aliran air di bawah permukaan yang cukup untuk pengisian cadangan reservoir.



Gambar 6. Sistem Panas Bumi (*Dickson dan Fanelli, 2013*)

Berdasarkan temperatur reservoir, Hochstein dan Browne (2000) mengklasifikasikan sistem panas bumi menjadi tiga, yaitu:

1. Sistem panas bumi temperatur tinggi (temperatur reservoir lebih besar dari 225°C).
2. Sistem panas bumi temperatur sedang (temperatur reservoir 125°C hingga 225°C).
3. Sistem panas bumi temperatur rendah (temperatur reservoir lebih kecil dari 125°C).

Sistem panas bumi di Indonesia dikelompokkan menjadi 3 jenis berdasarkan asosiasi terhadap tatanan geologinya (Kasbani, 2009):

1. Vulkanik

Sistem panas bumi yang berasosiasi dengan gunungapi kuarter merupakan sistem panas bumi vulkanik. Sistem panas bumi ini

biasanya terbentuk oleh susunan batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam, dimana biasanya memiliki karakteristik reservoir sekitar 1.5 kilometer dengan temperatur reservoir tinggi berkisar 250°C sampai kurang dari sama dengan 370°C . Umur batuan yang relatif muda dengan kondisi temperatur yang sangat tinggi dan kandungan gas magmatik besar biasanya ditemui pada daerah vulkanik aktif. Memiliki kemampuan batuan untuk mengalirkan fluida (permeabilitas) yang relatif kecil akibat faktor dari aktivitas tektonik yang belum dominan dalam pembentukan celah-celah/rekahan yang intensif sebagai batuan reservoir. Umur batuan sudah relatif lebih tua dan telah mengalami aktivitas tektonik yang cukup kuat untuk membentuk permeabilitas batuan dapat melalui rekahan dan celah yang intensif biasanya ditemui pada daerah vulkanik yang tidak aktif. Pada keadaan tersebut biasanya terbentuk suhu menengah sampai tinggi dengan konsentrasi gas magmatik yang lebih kecil. Sistem vulkanik dapat dibagi lagi menjadi beberapa tipe seperti; sistem tubuh gunung api strato jika hanya terdiri dari satu gunungapi utama dengan entalpi tinggi berkisar 250°C dengan potensi energi sedang antara 50 sampai 100 MW, sistem kompleks gunungapi jika terdiri dari beberapa gunungapi dengan entalpi tinggi berkisar 250°C dengan potensi energi kurang dari 100 MW, dan terakhir sistem kaldera jika sudah terbentuk kaldera dengan entalpi tinggi berkisar 250°C dengan potensi energi lebih dari 100 MW.

2. Vulkanik – Tektonik

Sistem yang berasosiasi antara struktur graben dan kerucut vulkanik dengan entalpi sedang - tinggi (200°C - $\sim 250^{\circ}\text{C}$) dan potensi energi sedang - besar (50 - >100 MW).

3. Non-Vulkanik

Sistem panas bumi yang tidak berkaitan langsung dengan vulkanisme (intrusi) dan umumnya berada di luar jalur vulkanik kuartar. Memiliki entalpi rendah - sedang ($\sim 200^{\circ}\text{C}$) dan potensi energi kecil - sedang (~ 50 MW)

Setiap sistem panas bumi memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lain. Keberadaan suatu sistem panas bumi biasanya ditandai dengan adanya manifestasi di permukaan. Beberapa manifestasi permukaan yang menunjukkan gejala adanya sistem panas bumi seperti (Suharno, 2012):

1. Mata air panas (*Hot Spring*)

Batuan dalam dapur magma dapat menyimpan panas sampai ribuan tahun, yang menyebabkan saat air tanah turun dan bersentuhan dengan magma akan menjadi air panas. Air yang panas cenderung akan naik ke permukaan melalui rekahan-rekahan yang disebut sebagai sumber mata air panas. Pada kondisi saat jumlah air panas yang sangat besar maka dapat disebut sebagai kolam air panas.

2. Fumarol dan Solfatara

Fumarol adalah lubang asap sebagai lokasi dari dikeluarkannya gas-gas hasil gunungapi. Biasanya fumarol ditemukan di sekitar gunung api atau pada terobosan rekahan-rekahan. Solfatara adalah lubang asap yang mengeluarkan gas belerang (sulfur) seperti SO_2 , H_2S , dan S. Sering ditemui belerang yang sudah mengendap sebagai kristal sebagai pelapis rekahan-rekahan pada batuan yang dilaluinya.

3. *Geyser*

Geyser adalah air tanah yang tersembur keluar sebagai kolam uap dan kolam air panas. Kolam tersebut terbentuk oleh adanya celah yang terisi air dari kawah, kemudian terdorong ke atas oleh tekanan uap air dari bawah. Semakin banyak akumulasi air didalam celah, maka semakin kuat tekanan uap air yang menekan dari bawah. Maka air yang tersembur ke atas akan semakin tinggi.

4. Uap Tanah (*Steaming Ground*)

Pada sebagian dari daerah lapangan panas bumi umumnya dijumpai tempat-tempat yang mengeluarkan air panas (*steam*) sampai terlihat di permukaan tanah. Manifestasi seperti ini biasanya disebut sebagai *steaming ground*. Uap panas ini diprediksi berasal dari suatu lapisan yang terdapat didekat permukaan yang mengandung air panas

dengan temperatur mendekati titik didihnya (*boiling point*) sehingga terjadi penguapan samapi di atas permukaan.

5. Lumpur Panas

Lumpur panas umumnya tidak banyak mengandung uap panas dan gas CO₂ yang tidak mudah menjadi cair (mengembun). Kondensasi uap panas menyebabkan lumpur panas sering ditemukan dalam keadaan cair. Gelembung-gelembung yang terjadi pada lumpur panas disebabkan oleh keluarnya gas CO₂.

6. Kawah (*crater*)

Kawah merupakan suatu bentuk depresi berbentuk corong terbuka ke atas pada puncak gunung api yang menjadi tempat disemburkannya tepra gas-gas, lava, dan gas-gas.

7. Batuan Alterasi

Batuan alterasi merupakan proses yang terjadi akibat interaksi antara batuan asal dengan fluida panas bumi. Batuan alterasi terjadi akibat beberapa faktor seperti suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH dan lamanya interaksi. Mineral-mineral hidrotermal dihasilkan dari interaksi batuan dengan *deep chloride water* (air klorida yang berasal dari reservoir dalam) biasa disebut juga mineral sekunder. Mineral-mineral seperti *epidiotite*, *chlorite*, dan *wairakite* biasa terbentuk pada kondisi suhu tinggi. Mineral lain seperti *adularia* dan *albit* terbentuk di tempat yang memiliki permeabilitas tinggi. Mineral hidrotermal lempung seperti *kaolinite* terbentuk akibat interaksi batuan dengan air yang bersifat asam.

3.6 Suhu Curie

Suhu Curie atau titik Curie adalah suhu di mana mineral ferromagnetik kehilangan sifat magnetiknya. Pada suhu Curie titik agitasi termal menyebabkan perataan spontan berbagai domain yang dihancurkan/diacak sehingga mineral ferromagnetik menjadi paramagnetik. Meskipun paramagnetisme dan diamagnetisme berkontribusi pada magnet batuan akan tetapi mineral ferromagnetik merupakan pembawa magnet dominan

dibebatkan. Mineral ferromagnetik yang dominan adalah *iron-titanium oxide* dan *iron sulfides*. *Magnetite* dengan suhu Curie 580°C adalah mineral magnetik dominan pada kerak bumi. Pada kedalaman *lithosphere* hampir bersifat nonmagnetik, yaitu tidak ada sumber magnetik yang dapat diperkirakan. Kedalaman suhu Curie juga dapat memberikan pemahaman tentang struktur termal misalnya, di daerah vulkanik perpindahan panas konvektif mempersulit penentuan struktur termal dari pengukuran aliran panas saja dan penentuan kedalaman titik Curie dari data magnetik dapat terbukti membantu untuk memahami struktur termal. Tingkat kedalaman sumber magnetik telah menjadi identik dengan kedalaman suhu Curie meskipun pada kenyataannya dapat mewakili batas petrologis atau suhu. Pengukuran magnetik dan studi petrologis menunjukkan bahwa mineral ferromagnetik umumnya tidak ada dalam mantel, setidaknya di wilayah benua (Rajaram, 2007).

4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop
2. *Software ArcMap*
3. *Software Oasis Montaj*
4. Data magnetik Kompleks Kaldera Ijen, Jawa Timur
5. *Microsoft Excel*

4.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan mulai dari persiapan dan pengumpulan data. Persiapan penelitian dengan membaca buku-buku dan jurnal-jurnal ilmiah yang berkaitan dengan daerah Kompleks Kaldera Ijen. Data yang dikumpulkan berupa peta struktur, peta *Digital Elevation Model* (DEM), peta geologi regional dan mengumpulkan informasi geologi daerah penelitian.

Pengolahan data diawali dengan melakukan *kriging data magnetic* yang tersimpan dalam format *Ms. Excel* pada *software Oasis Montaj* untuk membuat peta kontur total anomali. *Kriging* adalah salah satu metode interpolasi spasial yang memanfaatkan nilai spasial pada lokasi ter-*sampel* untuk memprediksi nilai pada lokasi lain yang belum dan/ atau tidak ter-*sampel*.

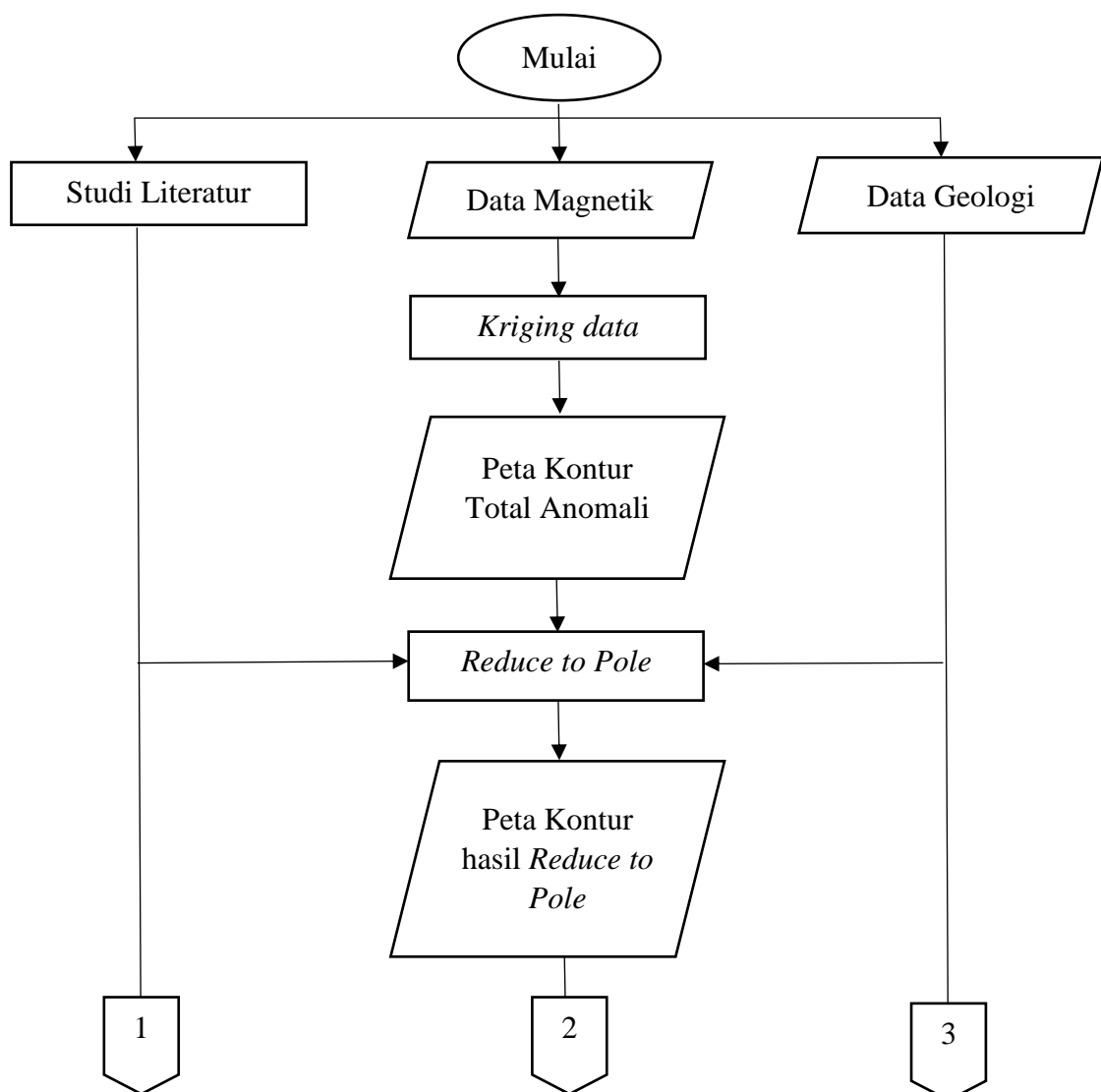
Kemudian dilakukan *reduce to pole* untuk mentrasformasi anomali *dipole* menjadi anomali *monopole*. *Reduce to pole* melokalisasikan daerah-daerah anomali magnetik tepat berada diatas tubuh penyebab anomalnya. Hal ini menyebabkan sudut inklinasi benda menjadi 90° dan deklinasinya 0° memungkinkan benda anomali berada pada nilai yang maksimum atau minimum sehingga memudahkan dalam melakukan interpretasi.

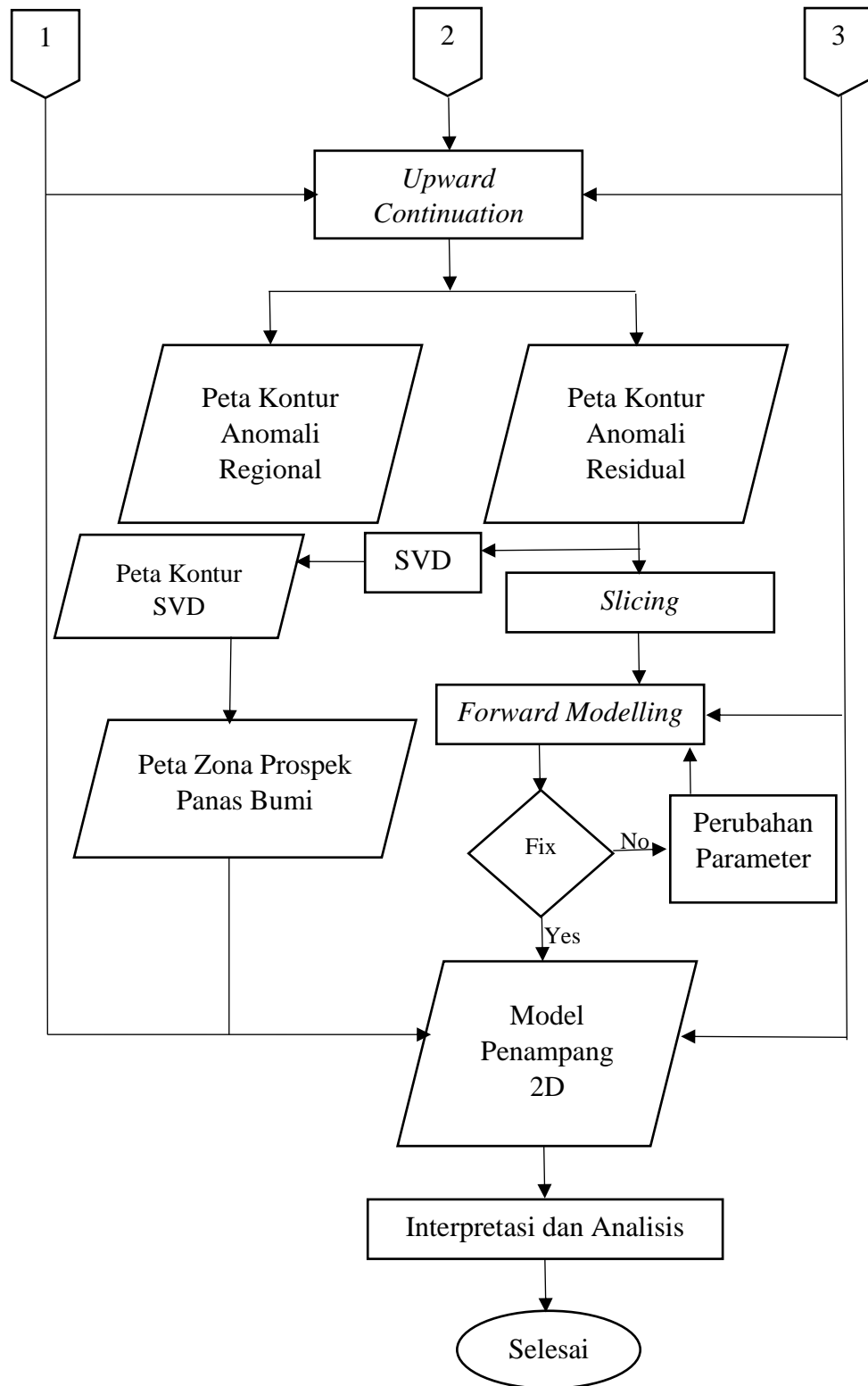
Selanjutnya dilakukan *upward continuation* untuk mengubah data medan potensial yang diukur pada suatu level permukaan menjadi data yang seolah-olah diukur pada level permukaan yang lebih atas. Saat *upward*

continuation dilakukan maka anomali dapat dilihat pada ketinggian yang berbeda (anomali regional). Semakin tinggi *upward continuation* yang dilakukan pada data maka semakin dalam perkiraan sumber anomali.

Setelah melakukan proses itu maka akan dihasilkan peta kontur anomali regional dan peta kontur anomali residual. Pada peta kontur anomali residual dilakukan *slicing* untuk membuat model 2D. Model 2D dilakukan dengan pemodelan ke depan (*forward modelling*). Pemodelan ke depan (*forward modelling*) merupakan pembuatan model melalui pendekatan berdasarkan intuisi geologi dengan membangun model lapisan bawah permukaan menggunakan data anomali magnetik total disepanjang lintasan titik koordinat tertentu.

Diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:





Gambar 7. Diagram Alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebaran nilai intensitas yang rendah pada kontur anomali magnetik terletak pada bagian timur daerah penelitian dengan rentang nilai dari -132 nT sampai -606.4 nT diidentifikasi sebagai letak dari zona panas bumi.
2. Hasil pemodelan penampang 2 dimensi menunjukkan sebaran nilai suseptibilitas batuan pada daerah penelitian dimana; Formasi Batuan Ijen Tua (Qpvi) memiliki nilai suseptibilitas 0.09 SI, Formasi Batuan Ijen Muda (Qhvi) memiliki nilai suseptibilitas 0.01 SI, Formasi Batuan Gunungapi Muda (Qv) memiliki nilai suseptibilitas 0.001 SI, dan Batuan Terobosan memiliki nilai suseptibilitas 0.07 SI.
3. Formasi Batuan Ijen Muda (Qhvi) diidentifikasi sebagai zona reservoir panas bumi pada daerah penelitian yang dijumpai pada ketinggian antara 1500 meter sampai 1700 meter.

6.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah perlu dilakukan penelitian geokimia pada daerah penelitian untuk mengetahui karakteristik reservoir panasbumi. Sehingga dapat mengetahui dan mengkaji potensi panas bumi pada daerah penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, A., Maryanto, S., dan Rachmansyah, A. 2013. Identifikasi Reservoir Daerah Panasbumi Dengan Metode Geomagnetik Daerah Blawan Kecamatan Sempol Kabupaten Bondowoso. *Jurnal Neutrino*. Vol. 6 (1), 1-10.
- Blakely, R. J. 1995. *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. New York: Cambridge University Press.
- Broto, S., dan Putranto, T. T. 2011. Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi. *Jurnal TEKNIK*. Vol. 32 (1), 79-87. ISSN 0852-1697.
- Daud, Y., Nuqrahmadha, W. A., Fahmi, F., Pratama, S. A., Rahman, K. R., dan Subroto, W. 2017. Discovering “Hidden” Geothermal Reservoir in Blawan-Ijen Geothermal Area (Indonesia) Using 3-D Inversion of MT Data. *Proceedings of 1st Geo Electromagnetic Workshop*.
- Daud, Y., Rosid, M. S., Fahmi, F., Yunus, F. M., dan Muflihendri, R. 2018. Identification of Geothermal Prospect Zone in Ijen Caldera (East Java) Using Geomagnetic Method and Landsat Data Analysis. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2017 (ISCPMS2017)*.
- Daud, Y., Rosid, S., Fahmi, F., Yunus, F. M., dan Muflihendri, R. 2018. Geomagnetic Survey to Explore High-Temperature Geothermal System in Blawan-Ijen, East Java, Indonesia. *E3S Web of Conferences 31*.
- Dewi, C. N., Maryanto, S., dan Rachmansyah, A. 2015. Sistem Panasbumi Daerah Blawan, Jawa Timur berdasarkan Survei Magnetotelurik. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*. Vol. 25 (2), 111-119. ISSN 0125-9849.
- Dickson, M. H., dan Fanelli, M. 2013. *Geothermal energy: utilization and technology*.

- Hochstein, M. P., dan Browne, P. R. L. 2000. Surface Manifestations of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. *Encyclopedia of Volcanoes*. Vol. 1, 835-855.
- Husein, S., Titisari, A. D., Freski, Y. R., dan Utama, P. P. 2016. *Panduan Ekskursi Geologi Regional 2016 Jawa Timur bagian barat, Indonesia*. Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.
- Irsyad, M., Sutrisno, Haryanto, D. 2018. Pemodelan 2D Batuan Bawah Permukaan Daerah Mamuju Sulawesi Barat dengan Menggunakan Metode Magnetik. *Jurnal Al-Fiziya*. Vol. 1 (1). P-ISSN 2621-0215.
- Kasbani. 2009. Tipe Sistem Panas Bumi Di Indonesia Dan Estimasi Potensi Energinya. *Buletin Sumber Daya Geologi*. Vol. 4 (3), 64-73.
- Kementerian ESDM. 2017. *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*. Jakarta. Direktorat Panas Bumi.
- Lanza, R., dan Meloni, A. 2006. *The Earth's Magnetism An Introduction for Geologists*. Springer-Verlag. Berlin.
- Rajaram, M. 2007. Depth To Curie Temperature. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 157–159.
- Ravat, D. 2007. Reduction to Pole. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 856–858.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons Inc. England.
- Rizkiani, D. N. dan Rustadi. 2019. Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gaya Berat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*. Vol. 5 (2), 130-140.
- Sheriff, R. E. 1989. *Geophysical Methods*. University Of Houston. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Sihombing, R., dan Rustadi. 2018. Pemodelan Dan Analisa Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panasbumi Kepahiang Berdasarkan Metode Gayaberat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*. Vol. 4 (2).
- Suharno. 2012. *Sistem Panas Bumi*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

- Sukojo, B. M., dan Mardiana, R. 2017. Geothermal Potential Analysis Using Landsat 8 and Sentinel 2 (Case Study: Mount Ijen). *The 5th Geoinformation Science Symposium 2017 (GSS 2017)*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.
- Suparman, Y., dan Gunawan, H. 2019. *Magnetic Source of Kawah Ijen and Subsurface Delineation from Magnetic Data*. PVMBG. Bandung.
- Suryanto. 1988. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Telford, W. M., L. P. Geldart., dan R. E. Sheriff. 1996. *Applied Geophysics Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Todd. 1959. *Groundwater Hydrology, First Edition*. New York. John Wiley & Sons.
- Zaennudin, A., Wahyudin, D., Surmayadi, M., dan Kusdinar, E. 2012. Prakiraan bahaya letusan Gunung Api Ijen Jawa Timur. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. Vol. 3 (2), 109-132.