PEMETAAN STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DI SEKITAR MANIFESTASI PANAS BUMI KRAKAL DENGAN MENGGUNAKAN METODE GEOMAGNETIK

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh

gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika

oleh

Lela Fahmi Chaerunnisah

4211412052

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2017

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi dengan judul "Pemetaan Struktur Bawah Permukaan di Sekitar Manifestasi Panas Bumi Krakal dengan Menggunakan Metode Geomagnetik" telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.

Hari : Jumat

Tanggal : 11 Agustus 2017

Semarang, 11 Agustus 2017

Pembimbing I	Pembimbing II
Dr. Khumaedi, M.Si.	Drs. Hadi Susanto, M.Si.
196306101989011002	195308031980031003

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ii

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 12 Oktober 2017

METERAI TEMPEL 15AAAAEF540642 6000 ENAM RIBU RUPIAH

Lela Fahmi Chaerunnisah

4211412052

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

iii

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Pemetaan Struktur Bawah Permukaan di Sekitar Manifestasi Panas Bumi Krakal dengan Menggunakan Metode Geomagnetik

disusun oleh

Lela Fahmi Chaerunnisah

4211412052

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA Unnes pada tanggal 22 Agustus 2017.

Panitia:

Ketua

Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si.,Akt.
196412231988031001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.
196807141996031005

Ketua Penguji

Dr. Ian Yulianti, S.Si., M.Eng.
197707012005012001

Anggota Penguji/
Pembimbing I

Dr. Khumaedi, M.Si.
196306101989011002

Anggota Penguji/
Pembimbing II

Drs. Hadi Susanto, M.Si.
195308031980031003

iv

MOTTO

Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.
Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan),
kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan yang lain).
Dan hanya kepada Tuhan-Mu lah hendaknya kamu berharap.
(Q.S. Al Insyirah: 6-8)
Kesuksesanmu tak bisa dibandingkan dengan orang lain,
melainkan dibandingkan dengan dirimu sebelumnya.
(Jaya Setiabudi)

PERSEMBAHAN

Untuk Papa, Mama, Adik, dan orang-orang terdekat yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim,

Alhamdulillah atas kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pemetaan Struktur Bawah Permukaan di Sekitar Manifestasi Panas Bumi Krakal dengan Menggunakan Metode Geomagnetik" dengan baik. Skripsi ini merupakan salah satu syarat wajib dalam memenuhi tugas pelaksanaan perkuliahan jenjang Sarjana (S1) di Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Zaenuri S.E., M.Si., Akt., Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang;
2. Dr. Suharto Linuwih M.Si., Ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang;
3. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si., Ketua Program Studi Fisika, Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang;
4. Dr. Khumaedi, M.Si., dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta meluangkan waktu untuk memberi masukan, saran, dan motivasi dalam proses penyusunan skripsi;
5. Drs. Hadi Susanto, M.Si., dosen pembimbing II yang dengan sabar membimbing, mengarahkan dan memberikan saran kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini;
6. Kepala Pengelola Pemandian Air Panas Krakal Kebumen yang telah memberikan arahan serta izin penelitian;
7. Bapak Winda yang telah memberikan arahan serta izin peminjaman alat untuk penelitian;
8. Mama, Papa, dan Adik tercinta yang telah memberikan doa, motivasi, dan dukungan kepada penulis;

9. Alwiyah, Arum, Ayu, Budi, Diah, Dodoh, Dwi, Edu, Eko, Elvira, Fajar, Herdita, Ifan, Ikhsana, Ivan Hadi, Koen, dan Miftachul yang senantiasa memberikan bantuan, semangat, motivasi, serta doa mereka untuk selalu mendukung penulis hingga terselesaikannya skripsi ini;
10. Teman-teman Fisika Unnes yang senantiasa terus memberikan dukungan, semangat, dan motivasi dalam menyelesaikan skripsi ini
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Semoga segala kebaikannya mendapatkan balasan dari Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna karena adanya keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis sendiri. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari semua pihak senantiasa penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap semoga karya kecil ini dapat memberikan manfaat bagi para pembacanya.

Semarang, 12 Oktober 2017

Lela Fahmi Chaerunnisah

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

ABSTRAK

Chaerunnisah, Lela Fahmi. 2017. *Pemetaan Struktur Bawah Permukaan di Sekitar Manifestasi Panas Bumi Krakal dengan Menggunakan Metode Geomagnetik*. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Dr. Khumaedi, M.Si. dan Pembimbing Pendamping Drs. Hadi Susanto, M.Si.

Kata Kunci: suseptibilitas magnetik, metode geomagnetik, panas bumi

Studi daerah potensi panas bumi menggunakan metode geomagnetik telah dilakukan untuk memetakan struktur bawah permukaan di sekitar manifestasi mata air panas Krakal berdasarkan data intensitas medan magnet total yang diperoleh dari pengukuran. Data pengukuran di lapangan dikoreksi harian, koreksi IGRF, reduksi ke kutub, dan kontinuasi ke atas untuk memperoleh nilai anomali magnetik, kemudian dilakukan pemodelan. Hasil yang didapat yaitu adanya sebaran anomali magnet positif dan anomali magnet negatif. Anomali magnet positif berkisar antara 0 nT sampai 100 nT berada pada rentang koordinat 356250 mE sampai 356470 mE dan 9157900 mS sampai 9158070 mS, sedangkan anomali negatif dengan nilai lebih kecil dari -100 nT cenderung mendominasi daerah penelitian. Anomali magnet paling negatif berapa pada rentang koordinat 356530 mE sampai 356600 mE dan 9158120 mS sampai 9158150 mS. Berdasarkan hasil pemodelan, keberadaan batu pasir dan batu gamping diduga sebagai lapisan pembawa air (air dingin) dengan nilai supseptibilitas magnetik berkisar antara 0,00001-0,0262 (satuan SI). Lapisan pembawa air yang terpanaskan oleh batuan intrusi (beku) ditafsirkan sebagai lapisan potensial air panas dengan nilai suseptibilitas magnetik negatif yaitu -0,091 dan -0,001 (satuan SI). Lapisan air panas dan air dingin diduga terpisahkan oleh lapisan batu lempung yang bersifat impermeabel .

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL i

PERSETUJUAN PEMBIMBING ii

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN iii

PENGESAHAN iv

MOTTO DAN PERSEMBAHAN v

PRAKATA vi

ABSTRAK viii

DAFTAR ISI ix

DAFTAR TABEL xii

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR LAMPIRAN xv

BAB

1. PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Batasan Masalah 4

1.4 Tujuan Penelitian 4

1.5 Manfaat Penelitian 4

1.6 Sistematika Penulisan Skripsi 5

2. TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Panas Bumi 6

2.1.1 Pengertian dan Karakteristik Panas Bumi atau *Geothermal* 8

2.1.2 Proses Terjadinya Panas Bumi 11

2.1.3 Sistem Panas Bumi Indonesia 15

2.1.4 Potensi Panas Bumi Krakal 18

2.2 Tinjauan Geologi Daerah Krakal 20

2.3 Metode Gemagnetik 20

2.3.1 Teori Dasar Metode Geomagnetik 24

2.3.1.1 Gaya Magnetik 24

2.3.1.2 Kuat Medan Magnetik 24

2.3.1.3 Intensitas Magnetik 24

2.3.1.4 Hubungan Intensitas Magnetik **M** dengan Medan Magnetik **H** 25

2.3.1.5 Hubungan Intensitas magnetik M dengan Hukum Curie ..25

2.3.1.6 Induksi Medan Magnet 25

2.3.1.7 Suseptibilitas Magnetik 26

2.3.2 Prinsip Kerja *Proton Precession Magnetometer* (PPM) 29

2.3.3 Medan Magnet Bumi 30

2.3.4 Faktor yang Mempengaruhi Medan Magnet Bumi 31

3. METODE PENELITIAN 34

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian 34

3.2 Tempat Penelitian 34

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

3.3 Alat dan Bahan 35
3.4 Prosedur Penelitian 35
3.4.1 Akuisisi Data 37
3.4.2 Pengolahan Data 37
3.4.2.1 Koreksi Harian (*Diurnal Correction*) 38
3.4.2.2 Koreksi IGRF 38
3.4.2.3 Reduksi ke Kutub 39
3.4.2.4 Kontinuasi ke Atas 40
3.4.3 Analisis Data 42
4. HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1 Intensitas Medan Magnet Total 43
4.2 Pengolahan Data 45
4.2.1 Koreksi Harian 45
4.2.2 Koreksi IGRF 45
4.3 Analisis Data 47
4.3.1 Interpretasi Kualitatif 47
4.3.1.1 Reduksi ke Kutub 48
4.3.1.2 Kontinuasi ke Atas 49
4.3.2 Interpretasi Kuantitatif 52
4.3.2.1 Sayatan AB 54
4.3.2.2 Sayatan CD 57
4.3.3 Distribusi Potensi Panas Bumi 58
5. PENUTUP 62

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

5.1 Kesimpulan 62

5.2 Saran 63

DAFTAR PUSTAKA 64

LAMPIRAN 68

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

2.1 Suseptibilitas magnetik batuan dan mineral 28

2.2 Klasifikasi badai gemagnet berdasarkan nilai indeks Dst 33

3.1 Tabel data pengamatan 37

4.1 Data hasil pengukuran 43

4.2 Parameter medan magnet bumi daerah penelitian 46

4.3 Interpretasi jenis batuan berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik sayatan AB.....55

4.4 Interpretasi jenis batuan berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik sayatan CD.....58

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

2.1 Penampang panas bumi 10

2.2 Pergerakan lempeng-lempeng tektonik 11

2.3 Perpindahan panas di bawah permukaan 12

2.4 Sistem hidrotermal 13

2.5 Manifestasi panas bumi di permukaan 14

2.6 Cadangan panas bumi di Indonesia 16

2.7 Peta potensi panas bumi di Pulau Jawa 19

2.8 Peta geologi daerah Krakal 20

2.9 Komponen-komponen medan magnet bumi 30

3.1 Lokasi titik pengambilan data penelitian 34

3.2 *Proton Precession Magnetometer* 35

3.3 Diagram alir penelitian 36

3.4 Hubungan antara medan magnet observasi dan reduksi ke kutub 39

3.5 Pengangkatan ke atas dari permukaan horizontal 41

4.1 Peta kontur intensitas medan magnet total 44

4.2 Peta kontur anomali magnet total 47

4.3 Peta kontur anomali magnet total hasil reduksi ke kutub 48

4.4 Peta kontur anomali magnet total hasil kontinuasi ke atas 49

4.5 Peta kontur anomali magnet lokal pada ketinggian 100 meter 51

4.6 Peta kontur anomali magnet regional pada ketinggian 100 meter 51

4.7 Peta kontur anomali magnet lokal hasil sayatan 53

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

4.8 Grafik pemodelan 2 dimensi sayatan AB 54

4.9 Grafik pemodelan 2 dimensi sayatan CD 57

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran Halaman

1. Data Hasil Pengukuran 68

2. Data Hasil Perhitungan Anomali 70

3. Surat Penetapan Dosen Pembimbing Skripsi 72

4. Surat Ijin Penelitian untuk Pemandian Air Panas Krakal Kebumen 73

5. Foto Kegiatan Pengambilan Data di Lapangan 74

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan semakin menipisnya cadangan minyak bumi dan gas (migas) di seluruh dunia akibat eksploitasi terus menerus, maka dibutuhkan pencarian sumber-sumber energi alternatif baru untuk mencegah peningkatan pasokan energi dari migas di masa mendatang (Singarimbun *et al.*, 2013). Energi alternatif yang menyimpan potensi paling besar bagi kelangsungan energi nasional adalah energi panas bumi atau *geothermal* (Hadiwijoyo, 2001). Panas bumi merupakan energi yang bersifat berkelanjutan dan pemanfaatannya relatif aman (Suhartono, 2012). Sumber panas bumi dengan cadangan energi yang besar dapat dikembangkan menjadi pembangkit tenaga listrik, sedangkan sumber daya dengan cadangan energi yang tidak terlalu besar dapat diarahkan untuk keperluan lain, seperti pemanfaatan langsung untuk pertanian dan geowisata (Gaffar *et al.*, 2007).

Indonesia memiliki 40% potensi panas bumi di dunia dengan total potensi energi mencapai 27.000 Mwe (Suhartono, 2012). Ironisnya, baru 4% saja dari potensi panas bumi tersebut yang telah dimanfaatkan. Minimnya pemanfaatan energi panas bumi ini tergambar dari komposisi sumber listrik di tanah air. Listrik yang digunakan di Indonesia sebagian besar memanfaatkan energi konvensional, baru 3% saja dari tenaga listrik yang ada di Indonesia yang memanfaatkan energi panas bumi (Suhartono, 2012). Menanggapi permasalahan tersebut, pengembangan lapangan panas bumi Indonesia sudah semestinya lebih difokuskan

pada daerah-daerah potensi panas bumi (Kasbani *et al.*, 2007).

Potensi panas bumi di wilayah Jawa Tengah bagian selatan berdasakan survei oleh Badan Geologi ditandai dengan kehadiran manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas di Kabupaten Cilacap, Kebumen, dan Wonosobo. Potensi panas bumi di Kabupaten Cilacap dan Wonosobo telah berkembang dan termanfaatkan, namun potensi panas bumi di Kabupaten Kebumen khususnya daerah Krakal masih perlu diteliti lebih lanjut (Permana *et al.*, 2013). Panas bumi Krakal perlu dikaji dengan melakukan suatu proses penelitian yang bertujuan mengidentifikasi sistem panas bumi untuk menentukan kelayakan sumber daya daerah potensi (Zarkasyi *et al.*, 2011).

Studi daerah potensi panas bumi menggunakan metode geolistrik telah dilakukan oleh Fauziyah *et al.* (2015) dengan menganalisis hasil pemodelan struktur bawah permukaan daerah mata air panas Krakal yang berada di Desa Krakal, Kecamatan Alian, Kabupaten Kebumen. Hasil penelitian hanya dapat menggambarkan struktur bawah permukaan hingga kedalaman 25 m. Selain itu, keberadaan air panas dan air dingin belum dapat terpetakan secara pasti karena alat geolistrik tidak memiliki sensitivitas yang baik terhadap perbedaan temperatur. Studi lanjutan dengan menggunakan metode geofisika lain seperti metode geomagnetik, metode gravitasi, dan metode mikroseismik perlu dilakukan untuk menjangkau struktur bawah permukaan yang lebih dalam.

Metode geomagnetik dan metode gravitasi lebih sensitif terhadap perubahan vertikal (Gaffar *et al.*, 2007), sedangkan untuk perubahan horizontal dapat teramati menggunakan metode mikroseismik (Hilyah, 2010). Metode geomagnetik dan

metode gravitasi efektif dilakukan sebagai survei awal untuk melihat potensi panas bumi suatu daerah sehingga struktur bawah permukaan yang berkaitan dengan manifestasi dan kondisi reservoir panas bumi dapat digambarkan. Jika dibandingkan dengan metode gravitasi, metode geomagnetik lebih mudah dalam akuisisi dan prosesing data (HMGI, 2014). Selain itu, metode geomagnetik baik digunakan pada studi panas bumi karena memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perbedaan temperatur dibandingkan dengan metode geolistrik (Broto & Putranto, 2011). Rendahnya nilai kemagnetan batuan pada sebuah sistem panas bumi dibandingkan dengan batuan sekelilingnya merupakan dasar penggunaan metode ini untuk studi panas bumi (Asrillah *et al.*, 2014). Ketelitian pengukuran menggunakan metode geomagnetik relatif tinggi dan pengoperasian di lapangan relatif sederhana, mudah, dan cepat (Nurdiyanto *et al.*, 2004). Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukanlah penelitian dengan menggunakan metode geomagnetik di sekitar manifestasi mata air panas Krakal sebagai survei awal daerah berpotensi panas bumi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

a. Bagaimana distribusi nilai intensitas medan magnet total dan anomali magnetik di sekitar manifestasi panas bumi Krakal berdasarkan data geomagnetik?
b. Bagaimana pola aliran air panas dan air dingin berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik batuannya?

1.3 Batasan Masalah

Pembatasan masalah dimaksudkan untuk membatasi ruang lingkup penelitian. Pembatasan masalah yang difokuskan adalah sebagai berikut:

a. Penelitian dilakukan di sekitar Pemandian Air Panas (PAP) Krakal, Desa Krakal, Kecamatan Alian, Kabupaten Kebumen.
b. Metode penelitian menggunakan metode geomagnetik.
c. Kondisi atau keadaan potensi panas bumi diketahui berdasarkan hasil pengolahan data intensitas medan magnet total yang diperoleh dari pengukuran dengan metode geomagnetik.
d. Pengolahan dan interpretasi data geomagnetik dilakukan dengan bantuan *software* yang tersedia yaitu Microsoft Excel, Surfer 12, MagPick, dan Mag2DC.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini diharapkan dapat:

a. mengetahui nilai intensitas medan magnet total dan anomali magnetik di sekitar manifestasi panas bumi Krakal berdasarkan data geomagnetik;
b. mengetahui pola aliran air panas dan air dingin berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik batuan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak, diantaranya yaitu:

a. Menambah informasi untuk keperluan pustaka dan ilmu pengetahuan.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

b. Hasil penelitian dapat dijadikan referensi mengenai zona potensi panas bumi Krakal berdasarkan data geomagnetik sehingga dapat dilakukan pengembangan dan pembangunan lanjutan daerah berpotensi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi disusun untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu: bagian awal skripsi, bagian isi skripsi, dan bagian akhir skripsi.

1. Bagian awal skripsi berisi tentang lembar judul, persetujuan pembimbing, lembar pengesahan, lembar pernyataan, motto dan persembahan, prakata, abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran.
2. Bagian isi skripsi terdiri dari:

   Bab I Pendahuluan yang berisi tentang latar belakang pemilihan judul, rumusan masalah, tujuan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan skripsi.

   Bab II Tinjauan Pustaka terdiri dari kajian mengenai landasan teori yang mendasari penelitian.

   Bab III Metode Penelitian berisi waktu dan tempat pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian serta prosedur penelitian.

   Bab IV Hasil dan Pembahasan berisi tentang hasil-hasil penelitian dan pembahasannya.

   Bab V Penutup berisi tentang kesimpulan dan saran.
3. Bagian akhir skripsi terdiri atas daftar pustaka dan lampiran.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Panas Bumi

Kebutuhan energi semakin meningkat seiring dengan tingginya permintaan, sementara ketersediaan energi yang selama ini digunakan dan berasal dari sumber yang tidak dapat diperbaharui semakin berkurang. Jika ketidakseimbangan ini terus berlangsung, maka diperkirakan krisis energi akan terjadi di seluruh pelosok dunia. Menanggapi ancaman tersebut, maka negara-negara di dunia memerlukan energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan domestik maupun internasional.

Indonesia termasuk negara yang sudah mendorong para peneliti, akademisi, dan praktisi mencari energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri yang selalu defisit akibat jumlah penduduk Indonesia yang terus meningkat. Letak geografis Indonesia yang diapit oleh tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Hindia-Australia, Eurasia, dan Pasifik membuat Indonesia dikenal sebagai negara rawan bencana. Di samping kerawanan bencana tersebut, di sisi lain Indonesia memiliki potensi energi dengan jumlah besar, baik energi fosil yang sudah sepertiga abad dieksplorasi maupun energi batu bara dan panas bumi yang berasal dari aktivitas gunung api (Asrillah *et al.*, 2014).

Energi panas bumi merupakan salah satu energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Menurut Kebijakan Energi Nasional (Perpres No. 5 Tahun 2006), kontribusi energi panas bumi ditargetkan dalam pembaharuan energi

nasional sebesar 5% pada tahun 2025 atau sekitar 9500 MW. Untuk mewujudkan target tersebut telah disusun *road map* pengembangan energi panas bumi yang memberikan kerangka waktu bagi pencapaiannya. Keberadaan regulasi tersebut harus diikuti dengan upaya-upaya dalam tatanan teknis, antara lain penyiapan data-data panas bumi hasil kegiatan survei atau eksplorasi, yang nantinya digunakan untuk persiapan Wilayah Kerja Pertambangan (WKP) panas bumi (Kasbani *et al.*, 2007).

Sumber energi panas bumi cenderung tidak akan habis, karena proses pembentukannya yang terus menerus selama kondisi lingkungannya (geologi dan hidrologi) dapat terjaga keseimbangannya. Mengingat energi panas bumi ini tidak dapat diekspor, maka pemanfaatannya dapat diarahkan untuk mencukupi kebutuhan energi domestik. Dengan demikian energi panas bumi akan menjadi energi andalan dan vital karena dapat mengurangi ketergantungan Indonesia terhadap sumber energi fosil yang kian menipis (Asrillah *et al.*, 2014).

Energi panas bumi dapat dipilih sebagai energi alternatif karena memiliki beberapa kelebihan, menurut Setyaningsih (2011) kelebihan energi panas bumi tersebut yaitu:

1. *indigeneous*: dapat dimanfaatkan secara langsung pada tempat terdapatnya sumber panas bumi maupun dengan melalui proses terlebih dahulu,
2. *renewable*: dapat diperbarui dengan menjaga cadangan air yang masuk ke dalam sistem panas bumi sehingga proses penguapan air oleh sumber panas tetap berlangsung,

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

3. *suistanable*: dapat dimanfaatkan secara terus menerus secara berkelanjutan karena dapat diperbaharui dalam jangka waktu yang relatif singkat,
4. ekonomis: konstruksi pembangkit yang bersumber dari energi panas bumi membutuhkan daerah yang lebih sempit serta biaya pemakaian energi panas bumi lebih murah dibanding bahan bakar fosil,
5. dan ramah lingkungan: dibandingkan dengan gas buangan bahan bakar fosil yang menyebabkan kenaikan suhu global dan kerusakan ozon, gas buangan dari energi panas bumi lebih aman karena sebagian besar gas buangannya berupa CO_2 (96%) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan bagi proses pembuatan minuman kaleng seperti *soft drink* dan pembuatan *dry ice.*

2.1.1 Pengertian dan Karakteristik Panas Bumi

Menurut bahasa *geothermal* terdiri dari 2 kata, yaitu *geo* yang berarti bumi dan *thermal* yang berarti panas, jika digabungkan berarti panas bumi. Secara istilah, panas bumi dapat diartikan sebagai energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya (Suhartono, 2012). Energi panas bumi merupakan energi panas alami dari dalam bumi yang ditransfer ke permukaan bumi secara konduksi atau konveksi. Sistem panas bumi merupakan perpindahan panas alami dalam volume tertentu dari kerak bumi pada sumber panas ke tempat pelepasan panas yang umumnya adalah permukaan tanah (Hochstein & Browne, 2000). Di Indonesia, sebagian besar sistem panas bumi terletak di daerah yang tinggi (*high terrain*), *reservoir* tersembunyi dengan kedalaman 1-3 km, strukturnya komplek, terletak di hutan yang lebat, dan beberapa lapangan memiliki *outflow* yang panjang dan dalam (Daud, 2010).

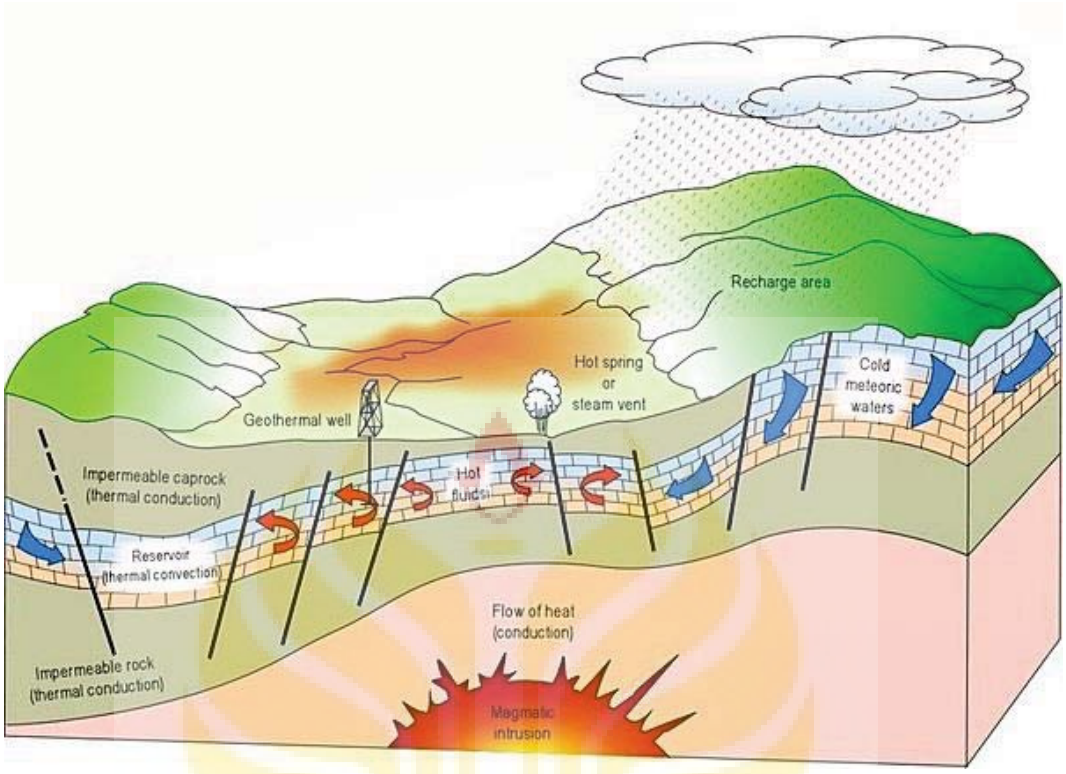
UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Sebagaimana halnya energi matahari, energi panas bumi sangat tersebar di seluruh bagian dalam bumi, sehingga sangat sukar untuk dikuasai. Akan tetapi pada beberapa tempat terdapat pada karang yang mencair (magma). Karena struktur dalam bumi, maka magma ditekan ke atas menjadi gunung berapi, atau magma terkurung dekat permukaan bumi. Magma yang terkurung ini mengeluarkan air panas atau uap air panas yang dapat dimanfaatkan untuk bermacam-macam keperluan energi (Baharuddin, 1988).

Energi panas bumi merupakan energi yang berpotensi untuk memacu pengembangan daerah yang terdapat sumber panas bumi, baik untuk pembangkit listrik maupun untuk kegunaan lain (Setyaningsih, 2011). Tetapi tidak semua sumber panas dapat dikatakan sebagai panas bumi (lihat Gambar 2.1). Setidaknya Suhartono (2012) berpendapat, ada 6 syarat sumber panas bisa dikategorikan ke dalam energi *geothermal*, di antaranya:

1. adanya batuan panas bumi berupa magma,
2. adanya persediaan air tanah secukupnya yang sirkulasinya dekat dengan sumber magma agar dapat terbentuk uap air panas,
3. adanya batuan *reservoir* yang mampu menyimpan uap dan air panas,
4. adanya batuan keras yang menahan hilangnya uap dan air panas (*cap rock*),

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



Gambar 2.1 Penampang panas bumi (Suhartono, 2012)

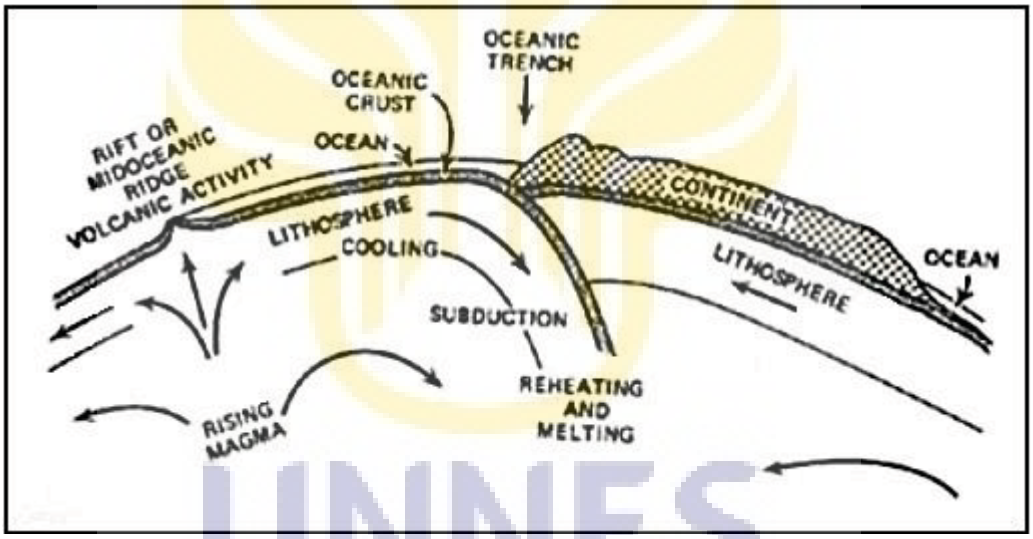
5. adanya gejala-gejala tektonik, dimana dapat terbentuk rekahan-rekahan di kulit bumi yang memberikan jalan kepada uap dan air panas bergerak ke permukaan bumi,
6. dan panasnya harus mencapai suhu tertentu minimum sekitar 180°-250°C.

Berdasarkan pada besarnya temperatur, Hochstein & Browne (1990) mengelompokan sistem panas bumi menjadi tiga, yaitu:

1. sistem/*reservoir* bertemperatur tinggi: yaitu suatu sistem yang mengandung fluida bertemperatur di atas 225ºC,
2. sistem/*reservoir* bertemperatur sedang, yaitu suatu sistem yang mengandung fluida bertemperatur antara 125ºC dan 225ºC,
3. dan sistem panas bumi bertemperatur rendah, yaitu suatu sistem yang mengandung fluida dengan temperatur lebih kecil dari 125ºC.

2.1.2 Proses Terjadinya Panas Bumi

Suhartono (2012) menjelaskan bahwa litosfer sebenarnya bukan merupakan permukaan yang utuh, tetapi terdiri dari sejumlah lempeng-lempeng tipis dan kaku. Lempeng merupakan bentangan batuan setebal 64-145 km yang mengapung di atas astenosfer. Lempeng-lempeng ini bergerak secara perlahan-lahan dan menerus. Di beberapa tempat lempeng-lempeng bergerak memisah, sementara di beberapa tempat lainnya lempeng-lempeng saling mendorong dan salah satu di antaranya akan menujam di bawah lempeng lainnya, seperti terlihat pada Gambar 2.2.



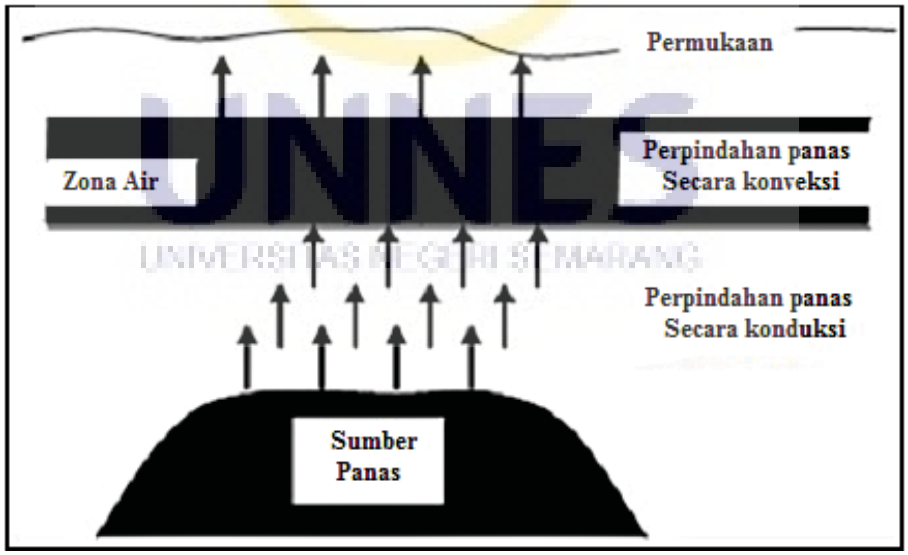
Gambar 2.2 Pergerakan lempeng-lempeng tektonik (Suhartono, 2012)

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Panas di dalam astenosfer dan panas akibat gesekan menyebabkan ujung dari lempengan tersebut hancur meleleh dan mempunyai temperatur tinggi (proses magmatisasi). Adanya material panas pada kedalaman beberapa ribu kilometer di bawah permukaan bumi menyebabkan terjadinya aliran panas dari sumber panas tersebut hingga ke pemukaan. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan

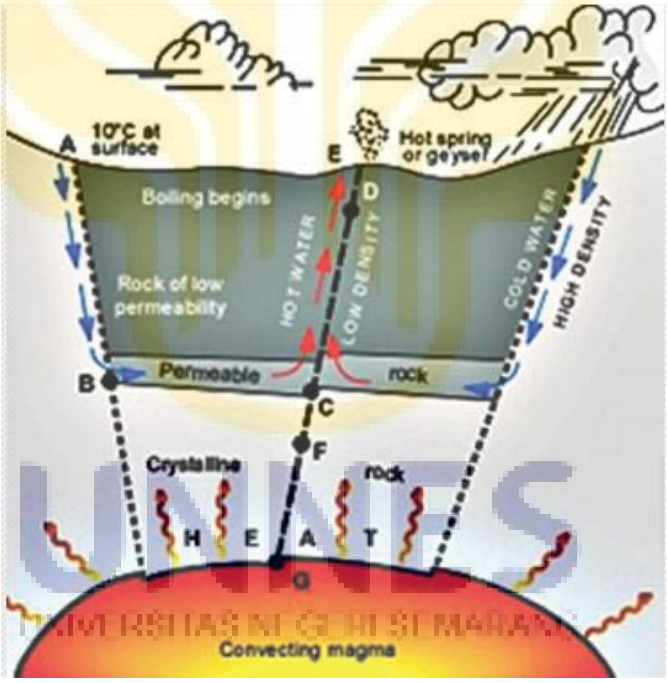
temperatur dari bawah hingga ke permukaan, dengan gradien temperatur rata-rata sebesar 300ºC/km (Suhartono, 2012).

Pada dasarnya sistem panas bumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi atau konveksi (Gambar 2.3). Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Air karena gaya gravitasi selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke bawah, akan tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi (Suhartono, 2012).



Gambar 2.3 Perpindahan panas di bawah permukaan (Suhartono, 2012)

Energi panas bumi diklasifikasikan ke dalam lima kategori, di antaranya: *earth energy* (energi bumi), *hot dry rock energy* (energi batuan panas kering), *magma energy* (energi magma), *geopressured energy* (energi tekanan bumi), dan *hydrothermal energy* (energi air panas) (Suhartono, 2012). Sebagian besar energi panas bumi yang telah dimanfaatkan di seluruh dunia merupakan energi yang diekstrak dari sistem hidrotermal (Gambar 2.4). Sistem hidrotermal erat kaitannya dengan sistem vulkanisme dan pembentukan gunung api pada zona batas lempeng yang aktif dimana terdapat aliran panas (*heat flow*) yang tinggi (Hadi, 2008).



Gambar 2.4 Sistem hidrotermal (Suhartono, 2012)

Sistem panas bumi hidrotermal merupakan sistem panas bumi yang mempunyai satu kesatuan antara sumber panas, *reservoir*, dan batuan penudung. Pada sistem ini, suatu lapangan panas bumi akan menghasilkan fluida panas bumi berupa uap, air panas ataupun kombinasi keduanya (Kasbani, 2009). Apabila

temperatur *reservoir* lebih rendah dari temperatur saturasi atau temperatur titik didih air pada tekanan *reservoir* tersebut, maka fluida hanya terdiri dari satu fasa saja, yaitu air. Apabila temperatur lebih tinggi dari temperatur saturasi atau temperatur titik didih air pada tekanan *reservoir* tersebut, maka fluida hanya terdiri satu fasa saja, yaitu uap. Apabila tekanan dan temperatur *reservoir* sama dengan tekanan dan temperatur saturasi air maka fluida terdiri dari dua fasa, yaitu campuran uap dan air (Saptadji, 2009).

Para ahli panas bumi pada prinsipnya sependapat dengan White (1967) bahwa sistem hidrotermal mempunyai empat komponen utama. Komponen tersebut terdiri dari sumber panas, daerah resapan untuk menangkap air hujan atau air lelehan salju (air meteorik), batuan *reservoir* yaitu batuan tempat fluida (umumnya air) panas terakumulasi, dan fluida atau air yang membawa panas dari *reservoir* ke permukaan bumi (Saptadji, 2009). Menurut Lawless (2008), sumber panas adalah intrusi batuan beku, diperkirakan terdapat pada kedalaman 2-5 km.

Adanya suatu sistem hidrotermal di bawah permukaan sering kali ditunjukkan oleh adanya manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*), seperti mata air panas, kubangan lumpur panas (*mud pools*), geiser, dan manifestasi panas bumi lainnya. Manifestasi panas bumi (Gambar 2.5) di permukaan diperkirakan terjadi karena adanya perambatan panas dari bawah permukaan atau karena adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan (Suhartono, 2012).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

(a) (b) (c)

Gambar 2.5 Manifestasi panas bumi di permukaan berupa (a) mata air panas, (b) kubangan lumpur panas, dan (c) geiser (Suhartono, 2012)

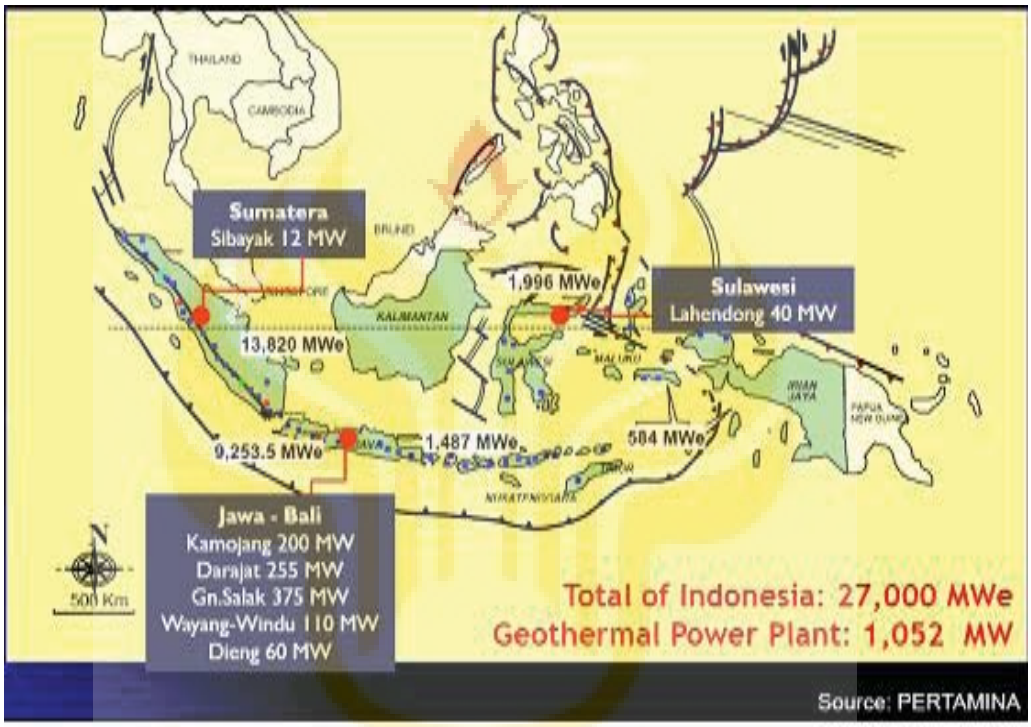
2.1.3 Sistem Panas Bumi Indonesia

Posisi Kepulauan Indonesia yang terletak pada pertemuan antara tiga lempeng besar (Hindia-Australia, Eurasia, dan Pasifik) menjadikan Indonesia memiliki tatanan tektonik yang kompleks. Subduksi antar lempeng benua dan samudera menghasilkan suatu proses peleburan magma dalam bentuk *partial melting* batuan mantel. Magma mengalami diferensiasi pada saat perjalanan ke permukaan sehingga membentuk kantong-kantong magma (*silisic* atau *basaltic*) yang berperan dalam pembentukan jalur gunung api yang dikenal sebagai lingkaran api (*ring of fire*). Munculnya rentetan gunung api Pasifik di sebagian wilayah Indonesia beserta aktivitas tektoniknya dijadikan sebagai model konseptual pembentukan sistem panas bumi Indonesia (Kasbani, 2009).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Sebanyak 252 lokasi panas bumi di Indonesia tersebar mengikuti jalur pembentukan gunung api yang membentang dari Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku sampai Papua (Gambar 2.6) dengan total potensi sekitar 27 GWe. Indonesia merupakan negara dengan potensi energi panas bumi terbesar di dunia. Besarnya potensi cadangan suatu lapangan panas bumi dapat digambarkan dengan beberapa parameter *reservoir* seperti temperatur, tekanan, dan entalpi yang

merepresentasikan energi termal yang terkandung di dalam fluida *reservoir* tersebut (Singarimbun, 2011). Energi panas bumi di Indonesia sangat beragam, ada yang memiliki entalpi tinggi (suhu > 200ºC) dan ada yang memiliki entalpi sedang hingga rendah (suhu < 200ºC) (Hasan, 2009).



Gambar 2.6 Cadangan panas bumi di Indonesia (Suhartono, 2012)

Sistem panas bumi Indonesia bersifat tipikal, yakni berasosiasi dengan magmatisme. Magma yang menerobos kerak bumi mendingin menjadi tubuh batuan beku intrusif panas. Batuan beku intrusif tersebut kemudian dipindahkan ke batuan-batuan di sekitarnya. Pada kondisi geologi yang sesuai, air tanah yang terkandung pada batuan *reservoir* yang bersifat porus dan permeabel terpanasi oleh tubuh batuan intrusif tersebut. Batuan *reservoir* biasanya tertutup oleh batuan penudung yang bersifat impermeabel yang berfungsi sebagai perangkap fluida *reservoir*. Rekah-rekah pada batuan penudung menjadi saluran keluar bagi uap atau

air panas, sehingga muncul manifestasi energi panas bumi seperti mata air panas (Utami, 1998).

Sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem hidrotermal yang mempunyai temperatur tinggi (>225ºC). Hanya beberapa di antaranya yang mempunyai temperatur sedang (125-225ºC). Kondisi tersebut sangat potensial apabila diusahakan untuk pembangkit listrik (Saptadji, 2009).

Berdasarkan asosiasi terhadap tatanan geologinya, sistem panas bumi di Indonesia dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu: vulkanik, vulkano-tektonik, dan *non*-vulkanik. Sistem panas bumi vulkanik adalah sistem panas bumi yang berasosiasi dengan gunung api Kuarter yang umumnya terletak pada busur vulkanik Kuarter yang memanjang dari Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, sebagian Maluku, dan Sulawesi Utara. Pembentukan sistem panas bumi ini biasanya tersusun oleh batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam dan umumnya memiliki karakteristik *reservoir* sekitar 1,5 km dengan temperatur *reservoir* tinggi (-250 ≤ 370°C). Sistem panas bumi vulkano–tektonik merupakan sistem yang berasosisasi antara struktur graben dan kerucut vulkanik, umumnya ditemukan di daerah Sumatera pada jalur sistem Sesar Sumatera (Sesar Semangko).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Sistem panas bumi *non*-vulkanik adalah sistem panas bumi yang tidak berkaitan langsung dengan vulkanisme dan umumnya berada di luar Vulkanik Kuarter. Lingkungan *non*-vulkanik di Indonesia bagian barat pada umumnya tersebar di bagian timur *Sunda Land* (Paparan Sunda) karena pada daerah tersebut didominasi oleh batuan yang merupakan penyusun kerak Benua Asia seperti batuan metamorf dan sedimen. Di Indonesia bagian timur lingkungan *non*-vulkanik berada

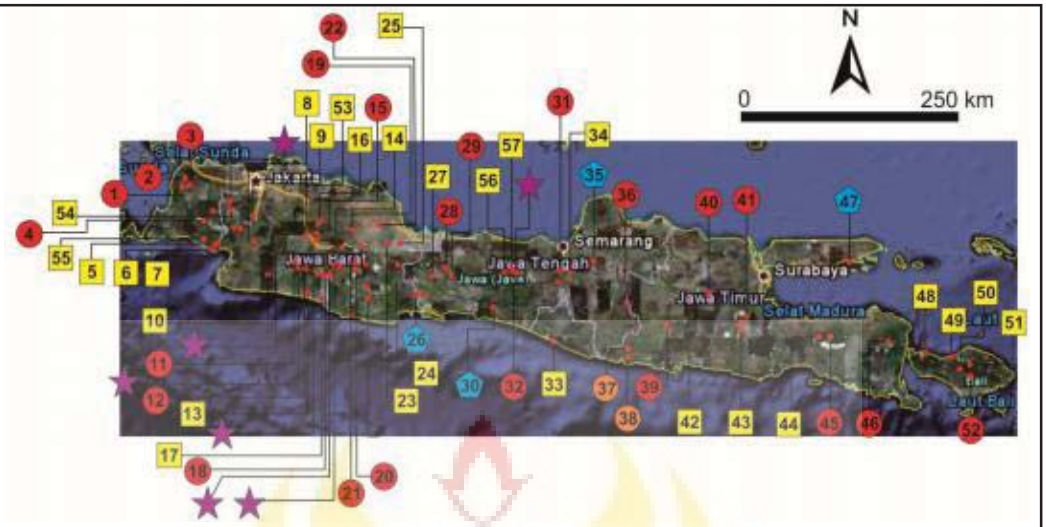
di daerah lengan dan kaki Sulawesi serta daerah Kepulauan Maluku hingga Irian didominasi oleh batuan granitik, metamorf, dan sedimen laut (Kasbani, 2009).

2.1.4 Potensi Panas Bumi Krakal

Pulau Jawa merupakan lapangan produksi panas bumi terbanyak. Terjadinya panas bumi di Pulau Jawa disebabkan oleh geologi *setting*. Di Jawa Tengah, salah satu daerah yang memiliki potensi panas bumi adalah Desa Krakal, Kecamatan Alian, Kabupaten Kebumen. Fenomena potensi panas bumi di daerah Krakal ditunjukkan dengan adanya mata air hangat yang terletak di Kecamatan Alian, sudut tenggara Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung seperti yang dilampirkan pada Lampiran 5.

Berdasarkan peta potensi panas bumi Pulau Jawa (Gambar 2.7), Krakal termasuk ke dalam sistem panas bumi *non*-vulkanik (Utama *et al.*, 2012). Secara geologis, daerah ini didominasi oleh batuan sedimen seperti Formasi Penosongan, Formasi Halang, dan Formasi Waturanda, yang terdiri dari batu pasir, batu kapur, batu lumpur, dan tufa. Potensi panas bumi Krakal dimungkinkan menjadi sistem zona patahan (*heat sweep system*) dan tidak terkait dengan aktivitas gunung berapi. Sistem dikontrol oleh Patahan Kedungramat, dengan sumber panas kemungkinan berasal dari sisa panas (radiasi granit) atau aktivitas tektonik yang intens di daerah Karangsambung (Utama *et al.*, 2012).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



GEOTHERMAL POTENTIAL MAP IN JAVA

1. G. Pulosari
2. Rawa Danau
3. G. Karang
4. G. Endut
5. Jampang
6. Cisolok
7. Cisukarame
8. Selabintana
9. G. Pancar
10. Tanggeung-Cibungur
11. Kawah Cibuni
12. Kawah Ciwidey
13. Cilayu
14. Maribaya
15. Tangkuban Perahu
16. Sagalaherang
17. Ciarinem
18. G. Papandayan
19. G. Tampomas
20. G. Talaga Bodas
21. G. Galunggung
22. G. Kromong
23. Sangkanhurip
24. Subang
25. Cibingin
26. Banyugaram-Cipari
27. Bumiayu
28. Guci
29. Baturaden-G.Slamet
30. Krakal
31. G. Ungaran
32. Candi Umbul Telomoyo
33. Parangtritis
34. Klepu
35. Kuwuk
36. G. Lawu
37. Melati
38. Rejosari
39. Telaga Ngebel
40. G. Pandan
41. G. Arjuno-Welirang
42. Cangar
43. Songgoriti
44. Tiris-G. Lamongan
45. Argopuro
46. Blawan-Ijen
47. Tirtosari
48. Banyuwedang
49. Seririt
50. Batukao
51. Penebel
52. Bratan
53. Bujal Jasingan
54. Ciseeng
55. Pamancalan
56. Mangunan Wanayasa
57. Candradimuka

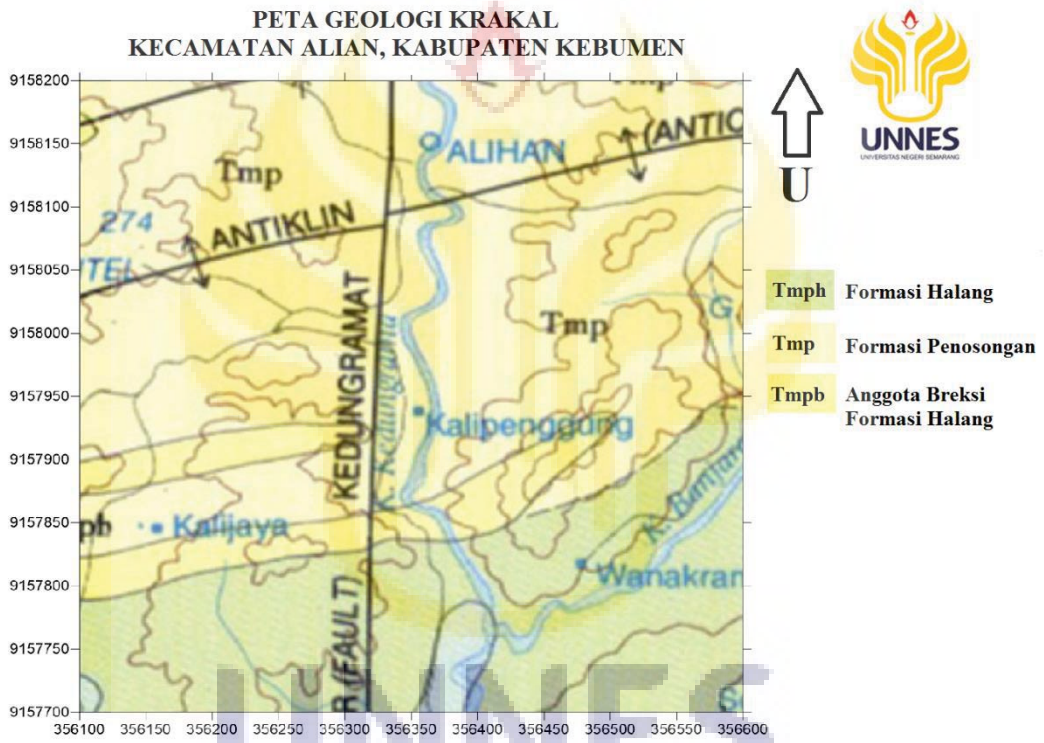
Keterangan :

- *Quartemary volcanic geothermal system*
- *Tertiary volcanic geothermal system*
- *Outflow system*
- *Non volcanic geothermal system*
- *Geothermal*

Gambar 2.7 Peta potensi panas bumi di Pulau Jawa (Utama *et al.*, 2012)

2.2 Tinjauan Geologi Daerah Krakal

Daerah penelitian yaitu sekitar Pemandian Air Panas (PAP) Krakal di Kecamatan Alian, Kabupaten Kebumen. Secara geografis daerah manifestasi panas bumi berada pada koordinat 356569 mE dan 9158123 mS. Adapun peta geologi daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Peta geologi daerah Krakal

Berdasarkan peta geologi lembar Kebumen (Asikin *et al.*, 1992) sebagaimana dikutip oleh (Fauziyah *et al.*, 2015), daerah Krakal berada pada Formasi Penosogan. Formasi ini merupakan endapan vulkano klastik jenis epiklastik yaitu endapan yang diletuskan gunung api kemudian bercampur dengan endapan atau sedimen, berupa perselingan batu pasir gampingan, batu lempung, tufa, napal, dan kalkarenit, serta

dipengaruhi arus turbid karena diendapkan di laut dalam. Umur formasi ini Miosen Awal-Miosen Tengah atau sekitar 20-12 juta tahun yang lalu.

Penelitian Raharjo *et al.* (2011) menggambarkan Kecamatan Alian termasuk ke dalam Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung. Pada Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung ini berhimpun beraneka ragam batuan, baik batuan beku, batuan sedimen, maupun batuan metamorf yang proses terbentuknya mulai dari dasar samudera hingga ke tepian benua. Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung merupakan bukti evolusi lempeng bumi yang terjadi sekitar 60 juta tahun yang lalu (Asikin *et al.*, 1992).

Sebagian besar wilayah Karangsambung merupakan daerah dengan topografi berbukit dengan kondisi permukaan yang masih mempunyai banyak singkapan batuan. Penampakan morfologi daerah tersebut dapat dikategorikan menjadi tiga satuan bentukan lahan, yang pertama yaitu bentukan lahan asal proses struktural (endogen) yang meliputi daerah patahan dan daerah lipatan. Kedua yaitu bentukan lahan asal denudasional meliputi daerah-daerah perbukitan sisa, sedangkan yang terakhir adalah daerah-daerah longsor yang merupakan bentukan lahan asal fluviatil meliputi daerah dataran aluvium (Raharjo *et al.*, 2011).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung ditinjau dari sejarah geologi memperlihatkan adanya bukti-bukti batuan berumur tua yang berasal dari dua lempeng; lempeng samudera dan lempeng benua. Batu-batuan tersebut merupakan hasil tumbukan Lempeng Hindia-Australia dengan Lempeng Benua Asia Tenggara sejak Kapur Akhir atau Tersier Awal (Asikin, 1974). Selain batuan yang tua, pada

daerah ini juga terdapat struktur geologi berupa sesar, lipatan, dan kekar. Struktur ini sangat intensif dan berkembang sangat luas di daerah ini.

Bukti-bukti struktur daerah tersebut terekam dalam hampir semua batuan yang ada di Karangsambung. Batu-batuan tersebut menampakkan suatu tubuh batuan yang sudah terkena deformasi yang sangat kuat dan berulang karena posisinya yang berada di dalam zona subduksi pada Zaman Kapur. Deformasi yang kuat menghasilkan rekahan-rekahan (*gash fracture*) ataupun kekar gerus (*shear joint*), dan di sebagian tempat memperlihatkan lipatan yang sangat kuat.

Stratigrafi daerah Krakal tersusun dari lima satuan litologi batuan tak resmi yaitu dimulai dari satuan breksi yang diendapkan pada Miosen Awal, kemudian satuan batu lempung batu pasir yang diendapkan secara selaras di atasnya, berumur Miosen Awal-Miosen Tengah. Di atas batuan ini diendapkan satuan batu lempung batu gamping yang berumur Miosen Tengah, dilanjutkan dengan satuan batu pasir yang diendapkan selaras di atasnya pada Miosen Akhir dan terakhir berupa endapan aluvial (Nugroho, 2013). Struktur geologi yang membentuk daerah ini berupa antiklin dan sinklin serta patahan yang mengontrol munculnya mata air panas tersebut (Fauziyah *et al.*, 2015).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.3 Metode Geomagnetik

Untuk melakukan estimasi panas bumi, dibutuhkan parameter-parameter fisis yang selanjutnya digunakan dalam rumus-rumus yang ada. Parameter-parameter ini dibagi menjadi dua yaitu parameter tetap dan variabel. Parameter tetap dapat ditentukan dengan asumsi berdasarkan statistik data hasil penyelidikan di berbagai

lapangan atau daerah panas bumi, sedangkan variabel ditentukan berdasarkan pengukuran langsung dan hasil pengolahan data lapangan (Suhartono, 2012).

Sebelum pemetaan eksplorasi panas bumi, perlu dilakukan survei pendahuluan dengan berbagai metode diantaranya adalah metode geofisika. Dari beberapa metode geofisika, metode geomagnetik merupakan metode pasif, sensitif, dan dapat digunakan untuk menganalisis *reservoir* panas bumi berdasarkan besarnya intensitas magnetik suatu batuan yang ditentukan oleh faktor kerentanan (suseptibilitas) magnetik *k* dari batuan tersebut (Afandi *et al.*, 2013). Suseptibilitas magnetik dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu batuan dalam menerima sifat magnet dari medan magnet bumi. Suseptibilitas magnetik suatu batuan sebanding dengan konsentrasi kelompok mineral magnetik di dalam batuan tersebut. Dengan kata lain, batuan yang sedikit atau sama sekali tidak mengandung mineral magnetik akan mempunyai intensitas magnetik yang kecil, sehingga untuk batuan yang telah mengalami ubahan atau pelapukan, intensitasnya akan rendah (Foeh & Lilirk, 2005).

Metode geomagnetik merupakan salah satu metode geofisika yang sering digunakan untuk survei pendahuluan pada eksplorasi minyak bumi, panas bumi, batuan mineral, maupun untuk keperluan pemantauan (*monitoring*) gunung api. Metode ini mempunyai akurasi pengukuran yang relatif tinggi. Selain itu, instrumentasi dan pengoperasian di lapangan relatif sederhana, mudah, dan cepat jika dibandingkan dengan metode geofisika lainnya (HMGI, 2012).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.3.1 Teori Dasar Metode Geomagnetik

2.3.1.1 Gaya Magnetik

Apabila terdapat dua buah kutub magnetik p_0 dan p yang berjarak *r*, maka akan terjadi gaya magnetik sebesar:

$$\mathbf{F} = \frac{p_0\, p}{\mu_0 r^2}\, \hat{r} \tag{2.1}$$

dengan μ_0 adalah permeabilitas medium dalam ruang hampa, tidak berdimensi dan berharga satu, sedangkan $\hat{r}$ menunjukkan vektor satuan dengan arah p_0 ke p. (Telford *et al.*, 1990).

2.3.1.2 Kuat Medan Magnetik

Kuat medan magnetik **H** adalah gaya pada suatu kutub magnetik (p_0) jika diletakkan pada titik dalam medan magnet yang merupakan hasil dari kuat kutub p.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{F}}{p_0} = \frac{p}{\mu_0 r^2}\, \hat{r} \tag{2.2}$$

Dimana *r* adalah jarak titik pengukuran dari p. Diasumsikan p_0 jauh lebih besar dari p, sehingga p_0 tidak menimbulkan gangguan terhadap medan **H** pada titik pengukuran. Satuan medan magnetik dalam SI adalah Ampere/meter (A/m), sedangkan dalam cgs adalah oersted, dimana oersted adalah 1 (satu) dyne/kutub magnet (Telford *et al.*, 1990).

2.3.1.3 Intensitas Magnetik

Intensitas magnetik adalah besaran yang menyatakan seberapa intensitas keteraturan atau kesearahan arah momen-momen magnetik dalam suatu material sebagai akibat dari pengaruh medan magnet luar yang melingkupinya. Intensitas

magnetik **M** didefinisikan sebagai momen magnetik **m** per satuan volume (Telford *et al.*, 1990).

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V} \tag{2.3}$$

2.3.1.4 Hubungan Intensitas Magnetik **M** dengan Medan Magnetik **H**

Intensitas magnetisasi dalam suatu material tergantung pada medan luar (**H**) dan suseptibilitas magnetik (k) batuan atau mineral tersebut (Telford *et al.*, 1990). Adapun hubungan intensitas magnetik dan medan magnetik sebagai berikut:

$$\mathbf{M} = k\,\mathbf{H} \tag{2.4}$$

Nilai suseptibilitas magnetik dalam ruang hampa sama dengan nol karena hanya benda yang berwujud saja yang dapat termagnetisasi.

2.3.1.5 Hubungan Intensitas Magnetisasi **M** dengan Hukum Curie

Atom dari bahan paramagnetik memiliki momen magnetik yang berorientasi secara acak dan medan magnet rata-rata nol. Dalam medan magnet luar **H**, momen magnetik cenderung menyelaraskan. Menurut Hukum Curie eksperimental nilai magnetisasi **M** adalah (Dobis *et al.*, 2010):

$$\mathbf{M} = \frac{C}{T}\,\mathbf{H} \tag{2.5}$$

dimana C merupakan konstanta Curie dan T adalah suhu.

2.3.1.6 Induksi Medan Magnet

Suatu bahan magnet yang diletakkan dalam medan magnet luar **H** akan menghasilkan medan tersendiri **H'** yang meningkatkan nilai total medan magnet

bahan tersebut. Induksi medan magnet didefinisikan sebagai medan magnet total bahan yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{H}' = \mu_0 \, (1 + k) \, \mathbf{H} \tag{2.6}$$

dimana satuan **B**, **H**, dan $\mathbf{H}'$dianggap sama dalam sistem satuan *cgs* (Telford *et al.*, 1990).

Hubungan medan sekunder $\mathbf{H}'$dengan intensitas magnet adalah:

$$\mathbf{H}' = 4\pi \, \mathbf{M} \tag{2.7}$$

Kedua persamaan di atas jika digabungkan akan menjadi:

$$\mathbf{B} = (1 + 4\pi k) \, \mathbf{H} \tag{2.8}$$

Konstanta $(1 + 4\pi k)$ sama dengan permeabilitas magnetik (μ) yang juga merupakan perbandingan antara **B** dan **H**, atau ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{B} = \mu \, \mathbf{H} \tag{2.9}$$

2.3.1.7 Suseptibililas Magnetik

Kemudahan suatu bahan untuk termagnetisasi ditentukan oleh supseptilitas magnetik (k). Besaran yang tidak berdimensi ini merupakan parameter dasar yang digunakan dalam metode geomagnetik. Suseptibilitas magnetik dapat diartikan pula sebagai derajat kemagnetan suatu benda. Harga k pada batuan akan semakin besar apabila dalam batuan semakin banyak dijumpai mineral-mineral yang bersifat magnetik (Maulana *et al.*, 2014).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik, material dibedakan menjadi tiga, yaitu ferromagnet, paramagnet, dan diamagnet.

a. Ferromagnet

Nilai suseptibilitas magnetik dari bahan ini besar dan positif serta tidak bergantung pada temperatur Curie karena material penyusun atomnya mempunyai momen magnet dan interaksi antara atom terdekatnya sangat kuat. Material ferromagnet dibagi menjadi 3 jenis, yaitu: ferromagnet seperti besi, nikel, dan kobalt; antiferromagnet (*hermatite* Fe_2O_3) biasanya terdapat di superkonduktor URu_2Si_2, logam *Chromium* Cr, *alloy* FeMn, dan NiO; dan ferrimagnet (*magnetite* Fe_3O_4 x *ilemine* $FeTiO_3$) yang muncul dalam bentuk gamet ferrit dan magnet.

b. Paramagnet

Nilai suseptibilitas magnetik dari bahan ini kecil dan positif serta berbanding terbalik dengan temperatur Curie. Medan magnet pada material ini hanya ada jika termagnetisasi oleh medan magnet dari luar. Jika pengaruh ini hilang maka medan magnet pada material ini akan ikut menghilang. Akibat adanya pengaruh termal gerakan momen dipolenya menjadi acak dan nilai induksi magnetnya kecil. Hal tersebut terjadi karena jumlah elektronnya ganjil dan hanya sebagian kecil spin yang dapat berpasangan.

c. Diamagnet

Nilai suseptibilitas magnetik dari bahan ini kecil dan negatif. Intensitas induksi dari bahan diamagnet berlawanan arah dengan gaya magnet atau medan polarisasi karena *k* bernilai negatif. Semua material menunjukkan respon sebagai

diamagnet ketika berada di dalam medan magnet. Contohnya adalah batuan kuarsa, *marmer graphite*, *rock salt*, *anhydrite*, *gypsum*, air, kayu, dan beberapa bahan organik seperti minyak dan plastik serta beberapa logam, salah satunya adalah tembaga. Jumlah elektronnya genap dan berpasangan sehingga efek magnetisasinya paling kuat dalam medan polarisasi.

Nilai suseptibilitas magnetik batuan dan mineral dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Suseptibilitas magnetik batuan dan mineral (Telford, 1990)

Jenis	Suseptibilitas x 10^{-3} (SI)	
	Tingkatan	Rata-rata
	Sedimen	
Dolomite	0-0.9	0.1
Limestones	0-3	0.3
Sandstones	0-20	0.4
Shales	0.01-15	0.6
	Metamorf	
Amphibolite		0.7
Schist	0.3-3	1.4
Phyllite		1.5
Gneeis	0.1-2.5	
Quartzite		4
Serpentine	3.0-17	
Slate	0-35	6
	Beku	
Granite	0-5.0	2.5
Rhyolite	0.2-3.5	0.3
Dolorite	1.0-35	17
Augite-syenite	30-40	
Olivine-diabase		25
Diabase	1-160	55
Porpgyry	0.3-200	60
Gabbro	1.0-90	70
Basalt	0.2-175	70
Diorite	0.6-120	85
Pyroxenite		125
Peridotite	90-200	150
Andesite		160

2.3.2 Prinsip Kerja *Proton Precession Magnetometer* (PPM)

Proton Precession Magnetometer (PPM) adalah suatu sensor untuk mengukur intensitas medan magnet total. Sensor ini berisi zat cair yang kaya akan proton, misalnya *methanol* atau *kerosene*. Di dalam sensor ini terdapat koil atau kumparan yang melingkupi zat cair tersebut. Koil ini dihubungkan dengan sumber arus DC dan sirkuit penghitung frekuensi.

Jika arus listrik dilewatkan melalui koil tersebut, maka akan timbul medan magnet dan mempolarisasikan proton pada arah koil. Pada saat arus diputus, koil akan dihubungkan dengan sirkuit penghitung frekuensi, sementara proton akan berpresisi pada arah medan magnet bumi. Gerakan momen magnetik proton akan menghasilkan medan magnet siklik yang menginduksi arus AC pada kumparan selama 2-3 detik sebelum proton berhenti berpresisi. Selama waktu tersebut, sirkuit penghitung frekuensi akan mengukur frekuensi presisi proton. Nilai frekuensi presisi proton ini dikonversi ke unit intensitas medan magnet dan ditransmisikan ke data *logger* yang dapat dibaca langsung (Winarsih, 2014).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2.3.3 Medan Magnet Bumi

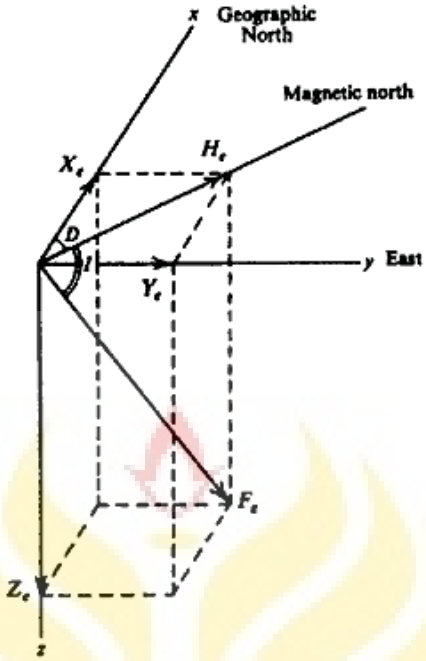
Komponen medan magnet yang berasal dari medan bumi merupakan efek yang timbul karena sifat inti bumi yang cair sehingga memungkinkan adanya gerak relatif antara kulit bumi dengan inti bumi yang disebut dengan efek dinamo. Komponen medan magnet bumi biasa disebut elemen medan magnet bumi yang mempunyai tiga arah utama yaitu komponen arah utara, komponen arah timur, dan

komponen arah bawah atau dalam koordinat kartesian dinyatakan dalam *X*, *Y*, dan *Z*. Elemen-elemen tersebut adalah:

a. deklinasi (*D*): merupakan sudut utara magnet bumi dengan komponen horizontal yang dihitung dari utara menuju timur (sudut antara utara geomagnet dan utara geografis),
b. inklinasi (*I*): merupakan sudut antara medan magnet total dengan bidang horizontal yang dihitung dari horizontal menuju vertikal ke bawah (sudut antara bidang horizontal dan vektor medan total),
c. intensitas horizontal (*H*): merupakan besar medan magnet total pada arah horizontal.
d. dan medan magnet total: merupakan besar medan vektor magnet total.

Deklinasi juga bisa disebut variasi harian kompas dan inklinasi disebut dengan dip. Bidang vertikal yang berhimpit dengan arah dari medan magnet disebut meridian magnet (Telford *et al.*,1990). Hubungan dari komponen-komponen tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.11.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



Gambar 2.9 Komponen-komponen medan magnet bumi (Telford et al, 1990)

Berdasarkan Gambar 2.11, intensitas komponen horizontalnya adalah:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{2.10}$$

Medan magnet total bumi adalah:

$$F = \sqrt{H^2 + Z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{2.11}$$

Sudut inklinasinya adalah:

$$I = arc\ tan \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2}} \tag{2.12}$$

Sudut deklinasinya adalah:

$$D = arc\ sin \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}} \tag{2.13}$$

2.3.4 Faktor yang Mempengaruhi Medan Magnet Bumi

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi medan magnet bumi, di antaranya:

1. Topografi

Topografi dapat mempengaruhi medan magnet suatu daerah. Pengaruh tersebut dapat dilihat dari korelasi antara kontur daerah dengan medan magnet daerah tersebut. Jika kontur daerah dan nilai medan magnet pada daerah tersebut tidak bersesuaian maka diperlukan koreksi topografi untuk menghilangkan pengaruh tersebut (Nurdiyanto *et al.*, 2004).

2. Medan magnet luar

Medan magnet bumi juga dipengaruhi oleh medan magnet luar. Sumber dari medan magnet luar ini berasal dari luar bumi atau hasil ionisasi di atmosfer yang ditimbulkan oleh sinar ultraviolet dari matahari. Sumbangan medan ini hanya sekitar 1% dari total medan bumi. Perubahan medan luar terhadap waktu jauh lebih cepat dibandingkan medan permanen karena sumber medan luar berhubungan dengan arus listrik yang mengalir dalam lapisan terionisasi di atmosfer luar akibat aktivitas matahari.

Perubahan medan magnet dalam waktu yang singkat dengan periode harian dikenal dengan variasi harian (*diurnal variation*). Variasi harian terjadi akibat adanya perubahan besar dan arah sirkulasi arus listrik yang ada di lapisan ionosfer. Proses ionisasi pada lapisan ionosfer menimbulkan fluktuasi arus sehingga terjadi variasi harian. Variasi harian terjadi secara periodik dengan periode sekitar 24 jam dan jangkauan rata-rata 10 nT hingga 30 nT.

Selain variasi harian, badai magnet (*magnetic storm*) juga menjadi sumber medan magnet luar. Badai magnet terjadi karena adanya aktivitas matahari terutama saat munculnya bintik matahari (*sunspot*). Jangkauan badai magnet

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

bisa mencapai ratusan hingga ribuan gamma dan berlangsung dalam beberapa jam. Pengukuran saat terjadi badai magnet tidak bisa dilakukan jika menggunakan metode magnet karena besar medan magnet yang dihasilkan oleh badai tersebut dapat mengganggu pengukuran (Telford *et al.*, 1990).

Indikasi terjadinya badai magnet dapat dilihat dari indeks *Dst* (*Disturbanced strom time*). Indeks *Dst* adalah suatu ukuran aktivitas geomagnet yang menjadi indikator terjadinya gangguan geomagnet atau dikenal dengan badai geomagnet. Badai geomagnet ditandai dengan menurunnya pergerakan intensitas pada indeks *Dst*. Variasi komponen *H* adalah medan magnet lokal yang diterima di bumi dari setiap pengamatan geomagnet. Variasi komponen *H* juga bisa dikatakan sebagai indeks Dst karena memiliki pola yang sama (Rachyany, 2009). Tabel 2.2 menunjukkan klasifikasi badai geomagnet.

Tabel 2.2 Klasifikasi badai geomagnet berdasarkan nilai indeks *Dst* (Rachyany, 2009)

Intensitas *Dst* (nT)	Klasifikasi *Dst*
$-50 \leq Dst < -30$	Lemah
$-100 \leq Dst < -50$	Sedang
$-200 \leq Dst < -100$	Kuat
$Dst < -200$	Sangat Kuat

3. Medan magnet utama

Medan magnet utama dapat didefinisikan sebagai medan rata-rata hasil pengukuran dalam jangka waktu yang cukup lama. Adanya perubahan medan magnet bumi terhadap waktu mengakibatkan ketidakseragaman nilai medan magnet bumi, sehingga untuk menyeragamkan nilai-nilai medan magnet bumi dibuatlah standar nilai yang disebut dengan *International Geomagnetics Reference Field* (IGRF). Nilai IGRF ini ditentukan berdasarkan kesepakatan

internasional di bawah pengawasan *International Association of Geomagnetic and Aeronomy* (IAGA) dan selalu diperbaharui setiap 5 tahun sekali (Telford *et al.*, 1990).

4. Medan magnet lokal

Medan magnet lokal sering disebut dengan anomali medan magnet (*crustal field*). Anomali medan magnet total bumi adalah medan magnet yang dihasilkan oleh anomali atau batuan termagnetisasi pada kerak bumi akibat induksi medan utama magnet bumi. Nilai anomali dapat dihitung dari pengukuran medan magnet total dikurangi medan magnet bumi melalui nilai IGRF yang sesuai dengan tempat penelitian (Telford *et al.*, 1990).

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Zona panas bumi Krakal berhubungan dengan adanya sebaran anomali magnet positif dan anomali magnet negatif pada daerah penilitian. Anomali magnet positif berkisar antara 0 nT sampai 100 nT berada pada rentang koordinat 356250 mE sampai 356470 mE dan 9157900 mS sampai 9158070 mS, sedangkan anomali negatif dengan nilai lebih kecil dari -100 nT cenderung mendominasi daerah penelitian. Anomali magnet paling negatif berapa pada rentang koordinat 356530 mE sampai 356600 mE dan 9158120 mS sampai 9158150 mS. Anomali negatif ditafsirkan sebagai daerah potensi panas bumi, didukung dengan keberadaan sumber air panas. Anomali magnet negatif di daerah studi merupakan respon akibat penurunan sifat kemagnetan batuan karena pengaruh panas pada alterasi hidrotermal sistem panas bumi.
2. Keberadaan air panas dan air dingin pada daerah penelitian dapat diketahui berdasarkan nilai suseptibilitas magnetik batuannya dan hubungannya dengan temperatur. Karakteristik dari batu pasir dan batu gamping yang mudah menangkap dan meloloskan air, memungkinkan lapisan tersebut sebagai lapisan pembawa air (air dingin) dengan nilai suseptibilitas magnetik berkisar antara 0,00001-0,0262 (satuan SI). Lapisan batu intrusi (beku) pada hasil pemodelan diduga merupakan lapisan batuan penyebab anomali. Lapisan tersebut dapat diindikasikan sebagai batuan yang teralterasi sangat kuat karena nilai

suseptibilitas magnetik yang berbanding terbalik dengan temperatur. Lapisan di atas batuan penyebab anomali dapat ditafsirkan sebagai daerah potensial air panas dengan nilai suseptibilitas magnetik yang negatif yaitu -0,091 dan -0,001 (satuan SI). Lapisan air panas dan air dingin pada daerah penelitian diduga terpisahkan oleh lapisan batu lempung yang bersifat impermeabel.

5.2 Saran

Penggunaan metode geomagnetik dalam pengukuran sebaiknya menggunakan dua alat magnetometer agar hasil pengukuran dapat teramati lebih detail dan teliti. Selain itu, pengukuran sebaiknya juga dilakukan pada cakupan area yang lebih luas sehingga pola aliran fluida panas dapat termati. Studi lanjutan dengan metode geofisika lain, seperti metode mikroseismik juga diperlukan untuk mendapatkan hasil studi daerah potensi panas bumi Krakal yang lebih sensitif terhadap perubahan horizontal.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR PUSTAKA

Afandi, A., S. Mayanto & A. Rachmasyah. 2013. Identifikasi Reservoar Daerah Panasbumi dengan Metode Geomagnetik Daerah Blawan Kecamatan Sempol Kabupaten Bondowoso. *Jurnal Neutrino*, 6(1): 1-10.

Asikin, S., A. Handoyo, H. Busana, & S. Gafoer. 1992. *Geologic Map of The Kebumen Quadrangle Java*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung: PPPG.

Asikin, S. 1974. *Evolusi Geologi Jawa Tengan dan Sekitarnya, Ditinjau dari Segi Teori Tektonik Dunia Baru*. Disertasi. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Asrillah, Marwan, I. Rusydy, & G. S. Nugraha. 2014. Application of Magnetics Method to Mapping the Geothermal Source at Seulawah Agam Area. *Jurnal Natural*, 14(2): 12-18.

Baharuddin. 1988. *Fisika Lingkungan*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Baranov, V & H. Naudy. 1964. *Numeric Calculation of the Formula of Reduction to Pole*. Geophysics.

Blakely, R. J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. New York: Cambridge Univ Press.

Broto, S. & T. T. Putranto. 2011. Aplikasi Metode Geomagnetik dalam Eksplorasi Panas Bumi. *Jurnal Teknik*, 32(1): 79-87.

Darmawan, S., H. Danusaputro & T. Yulianto. 2012. Interpretasi Data Anomali Medan Magnetik Total untuk Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Mud Vulcano (Studi Kasus Bledug Kuwu Grobogan). *Jurnal Geofisika*, 13(1): 7-15.

Daud, Y. 2010. *Introduction to Geothermal System and Technology*. Jakarta: Laboratorium Geofisika FMIPA Universitas Indonesia.

Dobis, P., J. Bruestlova, & M. Bartlova. 2010. Curie Temperature in Ferromagnetic Materials and Visualized Magnetic Domains. *3rd International Symposium for Engineering Education*. Ireland: University College Cork.

Fauziyah, S., Khumaedi, & S. Linuwih. 2015. Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Mata Air Panas Krakal Kebumen dengan Menggunakan Metode Geolistrik. *Unnes Physics Journal*, 4(2): 1-7.

Foeh, I. A. & R. R. Lilirk. 2005. *Penyelidikan Geomagnetik di Daerah Panas Bumi Kanan Tedong di Desa Pincara Kecamatan Masamba Kabupaten Luwu Utara Propinsi Sulawesi Selatan*. Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi.

Gaffar, E. Z., D. D. Wardhana, & D. S. Widarto. 2007. Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan G. Ungaran, Jawa Tengah dan Implikasinya terhadap Struktur Panas Bumi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 8(2):101-119.

Hadi, A. U. 2008. Potensi dan Wilayah Kerja Pertambangan Panas Bumi di Indonesia. *Jurnal Ilmiah MTG*, 1(2):1-10.

Hadi, M. N. 2012. *Panas Bumi Non-Vulkanik di Indonesia*. Bandung: PMG-Badan Geologi.

Hadiwijoyo, R. 2011. Geothermal: A green solution. *The Jakarta Post*, 26 Januari.

Hasan, A. 2009. Mesin Pengering Produk Pertanian Bertenaga Panas Bumi. *Jurnal Tek. Lingkungan*, 10(2):153-160.

Hilyah, A. 2010. Studi Gempa Mikro untuk Mendeteksi Rekahan di Area Panas Bumi Kamojang Kabupaten Garut. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 6(2): 1-5.

Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia. 2012. *Geophysics Field Camp 2012 Student Guidebook*. Klaten: Bayat.

Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia. 2014. *Buku Panduan Geophysical Fieldtrip 2014*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Hochstein, M. P. & P. R. L. Browne (eds). 1990. *Classification and Assessment of Geothermal Resourcess.* Roma: UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources.

Hochstein, M. P. & P. R. L. Browne (eds). 2000. *Surface Manifestation of Geothermal System with Volcanic Heat Source.* Roma: Academic Press.

Kasbani. 2009. *Tipe Sistem Panas Bumi di Indonesia dan Estimasi Potensi Energinya*. Kelompok Program Penelitian Panas Bumi, Bandung: PMG-Badan Geologi.

Kasbani, E. Suhanto, & Dahlan. 2007. Kesiapan Data Potensi Panas Bumi Indonesia dalam Mendukung Penyiapan Wilayah Kerja. *Proceeding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Lawless, J. W. 2008. *The Representation of Marginal Youth in Comtemporary Japanese Popular Fictio: Marginal Youth and Ishida Ira's Ikebukuro West Gate Park*. Amherst: University of Massachusetts.

Lita, F. 2012. *Identifikasi Anomali Magnetik di Daerah Prospek Panas Bumi Arjuna – Welirang*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.

Maulana, H. A., T. Yulianto, & U. Harmoko. 2014. Interpretasi Sistem Panas Bumi Gunung Telomoyo Bagian Utara Kabupaten Semarang Berdasarkan Data Geomagnet. *Youngter Physics Journal*, 3(4): 299-306.

Nugroho, B. A. 2013. *Geologi dan Geokimia Air Panas Bumi Daerah Krakal dan Sekitarnya Kabupaten Kebumen, Provinsi Jawa Tengah*. Tesis. Bandung: ITB.

Nurdiyanto, B., Wahyudi, & I. Suyanto. 2004. Analisis Data Magnetik untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Air Panas di Lereng Utara Gunungapi Ungaran. *Prosiding 29th HAGI*. Yogyakarta.

Permana, L. A. & E. Mulyadi. 2013. *Studi Geokimia Fluida Panas Bumi Daerah Jawa Tengah Bagian Selatan Provinsi Jawa Tengah*. Laporan Kelompok Penelitian Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi.

Rachyany, S. 2009. Analisis Indeks Disturbances Strom Time dengan Komponen H Geomagnet. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

Rafmin, F., R. Efendi, & Sandra. 2016. Pemodelan 2D Reservoar Geotermal Menggunakan Metode Geomagnet Pada Lapangan Panasbumi Mapane Tambu. *Journal of Natural Science*, 5(2) :172-182

Raharjo, P. D., A. U. Nur, & E. Hidayat. 2011. Aplikasi Sistem Informasi Geografis dalam Identifikasi Kerentanan Bencana Alam di Kawasan Cagar Alam Geologi Karangsambung. *Buletin Geologi Tata Lingkungan (Bulletin of Environmental Geology)*, 21(1): 23-33.

Santosa, B. J. 2013. Magnetic Method Interpretation to Determine Subsurface Structure Around Kelud Volcano. *Indian Journal of Applied Research*, 3(5): 328-331.

Saptadji, N. M. 2009. *Karakterisasi Reservoir Panas Bumi*. Training "Advanced Geothermal Reservoir Engineering". Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Sehah, S. A. Raharjo, & O. Wibowo. 2014. Pendugaan Model Sumber Anomali Magnetik Bawah Permukaan di Area Pertambangan Emas Rakyat Desa

Paningkaban, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas. *Jurnal Fisika Indonesia*, 53(18): 38-42.

Setyaningsih, W. 2011. Potensi Lapangan Panas Bumi Gedongsongo sebagai Sumber Energi Alternatif dan Penunjang Perekonomian Daerah. *Jurnal Geografi*, 8(1):11-14.

Singarimbun, A., C. A. N. Bujung, & R. C. Fatihin. 2013. Penentuan Struktur Bawah Permukaan Area Panas Bumi Patuha dengan Menggunakan Metoda Magnetik. *Jurnal Matematika dan Sains*, 18(2): 39-47.

Sugiyo, E. W., Supriyadi, & A. Yulianto. 2015. *Kajian Panas Bumi Daerah Medini-Gonoharjo Berdasarkan Data Geomagnetik*. Skripsi. Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Suhartono, N. 2012. Pola Sistim Panas dan Jenis Geothermal dalam Estimasi Cadangan Daerah Kamojang. *Jurnal Ilmiah MTG*, 5(2):1-14.

Tchernychev, M. 2001. *Magpick-Magnetic Map & Profile Processing*. User guide.

Telford, W. M., L. P. Geldart, & R. E. Sheriff. 1990. *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Utama, A. P., A. Dwinanto, J. Situmorang, M. Hikmi & R. Irsamukti. 2012. Green Field Geothermal System in Java. *Proceeding 1st ITB Geothermal Workshop 2012*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Utami, P. 1998. Energi Panas Bumi (Gambaran Umum). *ENERGI*, No. 2:39-42.

Winarsih, F. P. 2014. *Identifikasi Litologi Daerah Manifestasi Panas Bumi Parangwedang Kabupaten Bantul DIY dengan Metode Magnetik*. Skripsi. Yogyakarta: UIN Sunan Kalijaga.

Yudianto, H. & A. Setyawan. 2014. Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Panas Bumi Gedong Songo Gunung Ungaran Menggunakan Metode Magnetik. *Youngster Physics Journal*, 2(1): 39-48.

Zarkasyi, A., Y. Rezky, & M. Nurhadi. 2011. Keprospekan Panas bumi Gunung Ungaran Berdasarkan Analisis Geosain Terpadu. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 6(3): 23-29.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG