

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Suseptibilitas Magnet

Suseptibilitas magnet adalah kemampuan suatu bahan magnet untuk dimagnetisasi yang ditentukan oleh nilai suseptibilitas magnet yang ditunjukkan oleh persamaan:

$$\vec{M} = k\vec{H} \quad (1)$$

dengan \vec{M} adalah intensitas magnet dalam A/m, k adalah nilai suseptibilitas suatu bahan dan tidak memiliki dimensi serta \vec{H} adalah kuat medan magnet dalam A/m.

Nilai k adalah parameter dasar yang digunakan dalam metode magnet. Nilai suseptibilitas batuan semakin besar jika dalam batuan tersebut dijumpai banyak mineral yang bersifat magnet. Litologi (karakteristik) dan kandungan mineral batuan adalah faktor yang mempengaruhi harga suseptibilitas suatu bahan (Telford *et al*, 1990).

Tabel 1. Suseptibilitas Batuan Beku (Telford, *et al*, 1990).

Tipe Batuan	Suseptibilitas	
	Nilai	Rerata
Batuan Beku		
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	0.2-175	70
Diorite	0.6-120	85
Pyroxenite		125
Peridotite	90-200	150
Av. acidic igneous	0-80	8
Av. basic igneous	0.5-97	25

Berdasarkan nilai suseptibilitas magnet, material dibedakan menjadi:

1. Ferromagnet

Suseptibilitas material ferromagnet memiliki nilai antara 10^{-4} sampai 1.6 emu. Nilai k positif dan tidak bergantung pada temperatur Curie karena material penyusun atomnya mempunyai momen magnet dan interaksi antara atom terdekatnya sangat kuat. Kombinasi antara orbit elektron dan gerak spinnya menghasilkan medan magnet yang 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.

2. Paramagnet

Nilai suseptibilitas dari bahan ini antara 4×10^{-6} sampai $3,6 \times 10^{-4}$ emu dan 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 pun akan ikut menghilang. Akibat adanya pengaruh termal gerakan momen dipolnya menjadi acak dan nilai induksi magnetnya kecil. Hal tersebut terjadi karena jumlah elektronnya ganjil dan hanya sebagian kecil spin yang dapat berpasangan.

3. Diamagnet

Nilai suseptibilitas material ini antara -8×10^{-6} sampai 3×10^{-4} emu. 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, *marmar 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.

B. Induksi Medan Magnet

Suatu bahan magnet yang diletakkan dalam medan magnet luar \vec{H} akan menghasilkan medan tersendiri \vec{H}' yang meningkatkan nilai total medan magnet bahan tersebut. Induksi medan magnet didefinisikan sebagai medan magnet total bahan yang dapat ditulis sebagai (Winarsih, 2010):

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{H}' \quad (2)$$

dimana satuan \vec{B} , \vec{H} dan \vec{H}' dianggap sama dalam sistem satuan cgs.

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

$$\vec{H}' = 4\pi\vec{I} \quad (3)$$

sehingga:

$$\vec{B} = (1 + 4\pi k)\vec{H} \quad (4)$$

Konstanta $1+4\pi k$ sama dengan permeabilitas magnet (μ) yang juga merupakan perbandingan antara \vec{B} dan \vec{H} sehingga dapat ditulis sebagai:

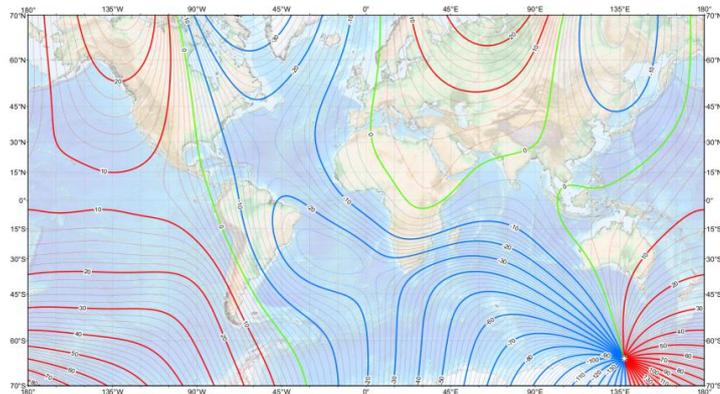
$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (5)$$

C. Medan Magnet Bumi

1. Komponen-Komponen 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:

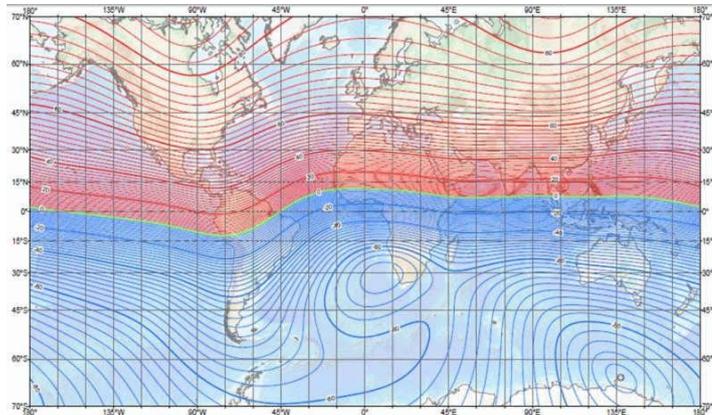
- a. *Deklinasi (D)*, merupakan sudut utara magnet bumi dengan komponen horizontal yang dihitung dari utara menuju timur (sudut antara utara geomagnet dan utara geografis). Peta deklinasi medan magnet bumi ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Peta Deklinasi Medan Magnet Bumi (NOAA, 2015).

- b. *Inklinasi (I)*, merupakan sudut antara medan magnet total dengan bidang horizontal yang dihitung dari horizontal menuju vertikal ke bawah (sudut

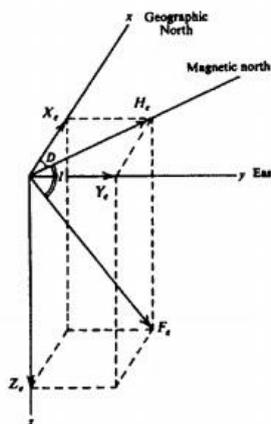
antara bidang horizontal dan vektor medan total) diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Inklinasi Medan Magnet Bumi (NOAA, 2015).

- c. *Intensitas horizontal* (H), merupakan besar medan magnet total pada arah horizontal.
- d. *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 5.



Gambar 5. Komponen-Komponen Medan Magnet Bumi (Telford *et al*, 1990).

Berdasarkan Gambar 5, intensitas komponen horizontalnya adalah:

$$\vec{H} = \sqrt{\vec{X}^2 + \vec{Y}^2} \quad (6)$$

Medan magnet total bumi adalah:

$$\vec{F} = \sqrt{\vec{H}^2 + \vec{Z}^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (7)$$

Sudut inklinasinya adalah:

$$\mathbf{I} = \text{arc tan} \frac{\vec{Z}}{\sqrt{\vec{X}^2 + \vec{Y}^2}} \quad (8)$$

Sudut deklinasinya adalah:

$$\mathbf{D} = \text{arc sin} \frac{\vec{Y}}{\sqrt{\vec{X}^2 + \vec{Y}^2}} \quad (9)$$

2. Faktor Topografi Terhadap Medan Magnet

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 bersesuaian maka diperlukan koreksi topografi untuk menghilangkan pengaruh tersebut.

Koreksi topografi dalam metode geomagnet dilakukan ketika pengaruh topografi terhadap medan magnet sangat kuat. Koreksi topografi dalam metode medan magnet tidak memiliki aturan yang jelas. Salah satu metode untuk melakukan koreksi topografi adalah menggunakan transformasi pseudogravitasi dan gradient horizontal (Nurdiyanto *et al*, 2004). Transformasi tersebut digunakan untuk menghilangkan pengaruh topografi terhadap medan magnet suatu daerah.

3. Medan Magnet Luar

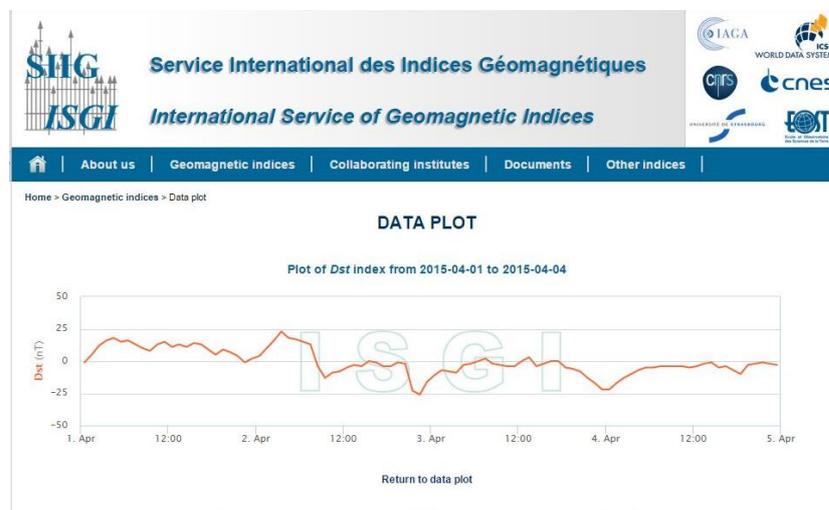
Medan magnet bumi juga dipengaruhi oleh medan magnet luar. Sumber dari medan magnet luar ini berasal dari luar bumi atau hasil ionisasi di atmosfer yang ditimbulkan oleh sinar ultraviolet dari matahari. Sumbangan medan ini hanya sekitar 1% dari total medan bumi.

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 gamma hingga 30 gamma.

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 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). Gambar 6 menunjukkan grafik Dst selama penelitian dan Tabel 2 menunjukkan klasifikasi badai geomagnet.



Gambar 6. Grafik Dst Penelitian (ISGI, 2015).

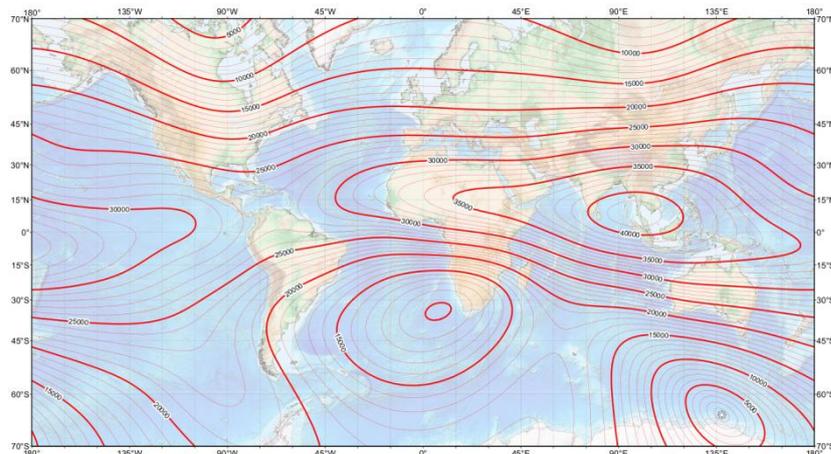
Tabel 2. Klasifikasi Badai Geomagnet Berdasarkan Nilai Indeks Dst (Rachyany, 2009)

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

4. Medan Magnet Utama

Medan magnet utama dapat didefinisikan sebagai medan rata-rata hasil pengukuran dalam jangka waktu yang cukup lama. Proses ini tidak akan

menghilangkan medan periodik yang berasal dari luar, begitu juga spektrum panjang gelombang, medan magnet utama, dan medan magnet lokal. Adanya perubahan medan magnet bumi terhadap waktu mengakibatkan ketidakteraturan nilai medan magnet bumi, sehingga untuk menyeragamkan nilai-nilai medan magnet bumi dibuatlah standar nilai yang disebut dengan *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*. Nilai medan magnet ini ditentukan berdasarkan kesepakatan internasional di bawah pengawasan *International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)*. Nilai IGRF selalu diperbaharui setiap 5 tahun sekali yang didapatkan dari hasil rata-rata pengukuran selama satu tahun pada daerah dengan luasan sekitar 1 km² (Telford *et al*, 1990) seperti diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Peta Intensitas Total Medan Magnet Bumi (NOAA, 2015).

5. Medan Magnet Lokal (Anomali)

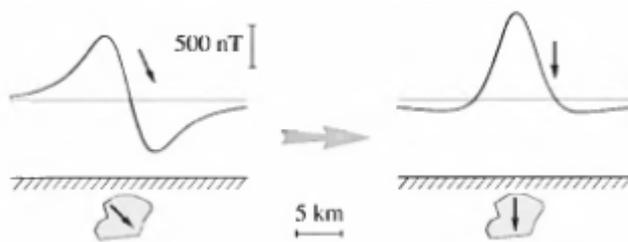
Medan magnet lokal sering disebut dengan anomali medan magnet (*crustal field*). Anomali medan magnet total bumi adalah medan magnet yang dihasilkan oleh anomali atau batuan termagnetisasi pada kerak bumi akibat

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).

D. Transformasi Medan Magnet

1. Reduksi Ke Kutub

Metode reduksi ke kutub magnet bumi berguna untuk mengurangi tahap yang sulit dalam proses interpretasi data dengan menunjukkan anomali medan magnet pada posisi benda tersebut. Reduksi dilakukan dengan mengubah sudut inklinasi dan sudut deklinasi menjadi 90° dan 0° seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Anomali Medan Magnet Hasil Reduksi ke Kutub (Blakely, 1995).

Proses transformasi reduksi ke kutub dilakukan dengan mengubah arah distribusi magnetisasi dan medan utama dalam arah vertikal. Salah satunya adalah dengan menggunakan transformasi Fourier (Blakely, 1995):

$$F[\Delta T_r] = F[\psi_r]F[\Delta T] \quad (10)$$

dimana:

$$F[\psi_r] = m \frac{1}{\Theta_m \Theta_f} = \frac{|k|^2}{a_1 k_x^2 + a_2 k_y^2 + a_3 k_x k_y + i|k|(b_1 k_x + b_2 k_y)}, |k| \neq 0 \quad (11)$$

dengan nilai $a_1 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_x \hat{f}_x$, $a_2 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_y \hat{f}_y$, $a_3 = -\hat{m}_y \hat{f}_x - \hat{m}_x \hat{f}_y$ dan nilai $b_1 = \hat{m}_x \hat{f}_z + \hat{m}_z \hat{f}_x$ serta $b_2 = \hat{m}_y \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_y$. $F[\psi_r]$ adalah transformasi Fourier reduksi ke kutub. $F[\Delta T]$ adalah transformasi Fourier anomali medan magnet yang diukur di kutub. $F[\Delta T_r]$ adalah transformasi Fourier medan magnet yang diakibatkan oleh magnetisasi sumbernya. k adalah bilangan gelombang (*wavenumber*). Θ_m adalah fungsi kompleks magnetisasi. Θ_f adalah fungsi kompleks medan utama. $\hat{m}_{x,y,z}$ adalah vektor satuan dalam arah magnetisasi (x,y,z). $\hat{f}_{x,y,z}$ adalah vektor satuan dalam arah medan magnet utama (x,y,z).

Persamaan (11) menunjukkan transformasi anomali medan magnet total yang diukur pada sebuah lokasi dengan arah magnetisasi dan medan utama dengan nilai tertentu sehingga membentuk anomali yang berbeda. Perubahan ini terjadi karena perubahan arah vektor magnetisasi dan medan utama, meskipun anomali tersebut disebabkan oleh distribusi magnetisasi yang sama (Blakely, 1995).

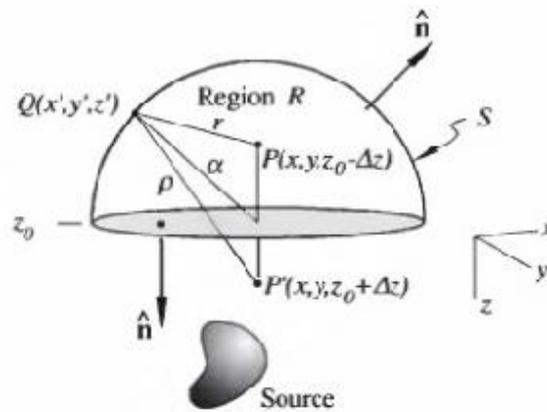
2. Kontinuasi ke Atas

Kontinuasi ke atas dilakukan dengan mentransformasikan medan potensial yang diukur di permukaan tertentu ke medan magnet potensial pada permukaan lain yang lebih jauh dari sumber. Transformasi ini memperlemah anomali-anomali sebagai fungsi panjang gelombang, dimana semakin pendek panjang gelombangnya maka semakin besar atenuasinya. Konsep dasar kontinuasi ke atas berasal dari identitas ketiga teorema Green. Teorema ini menjelaskan apabila suatu fungsi U bersifat harmonik, kontinyu, dan mempunyai turunan yang

kontinyu di sepanjang daerah R, maka nilai U pada suatu titik P di dalam daerah R dapat dinyatakan dengan persamaan (Blakely, 1995):

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (12)$$

dengan S adalah permukaan daerah R, n menunjukkan arah normal keluar dan r adalah jarak antara titik P ke suatu titik pada permukaan S. Persamaan (12) dan Gambar 9 menjelaskan prinsip dasar dari kontinuitas ke atas, dimana medan potensial dapat dihitung pada setiap titik dalam suatu daerah berdasarkan sifat medan pada permukaan yang melingkupi daerah tersebut.



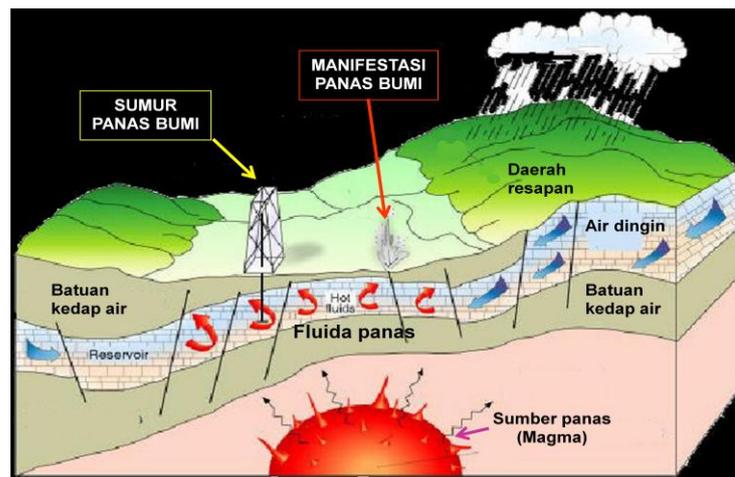
Gambar 9. Kontinuitas ke Atas dari Permukaan Horizontal (Blakely, 1995).

E. Panas Bumi atau Geotermal

1. Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi atau sistem geotermal terdiri atas 4 elemen utama, yaitu batuan reservoir permeable, sistem hidrologi yang membawa air dari reservoir ke permukaan, sumber panas (*heat source*), dan *cap rock* atau *clay cap* (lapisan penutup) seperti diperlihatkan pada Gambar 10. Dalam sudut pandang geologi, magma yang berada di dalam bumi merupakan sumber energi panas bumi yang berfungsi sebagai kompor yang menyala. Magma tersebut menghantarkan

panas secara konduktif pada batuan yang ada di sekitarnya. Akibat panas tersebut terjadi aliran konveksi fluida hidrotermal di dalam pori-pori batuan. Fluida hidrotermal ini akan bergerak ke atas menuju permukaan namun tidak sampai karena terhalang oleh lapisan batuan yang bersifat impermeable (Lita, 2012). Fluida hidrotermal yang tertahan akan menjadi lebih dingin dan akan turun kembali, hal ini akan terjadi berulang-ulang sehingga menyebabkan terjadinya arus konveksi. Arus konveksi mengakibatkan fluida hidrotermal terakumulasi pada suatu tempat yang disebut reservoir atau lebih tepatnya reservoir panas bumi. *Cap rock* memiliki peran untuk menjaga air yang berada pada reservoir agar memiliki tekanan yang tetap dan tidak bercampur dengan air permukaan, sehingga fluida hidrotermal yang berada di reservoir akan terpisah dengan *groundwater* (air tanah) yang lebih dangkal. Fluida hidrotermal akan berakumulasi di reservoir sehingga menyebabkan tekanan akan semakin besar dan mengakibatkan fluida tersebut bergerak ke atas dan menimbulkan rekahan-rekahan dan muncul di permukaan sebagai manifestasi panas bumi (Winarsih, 2014).

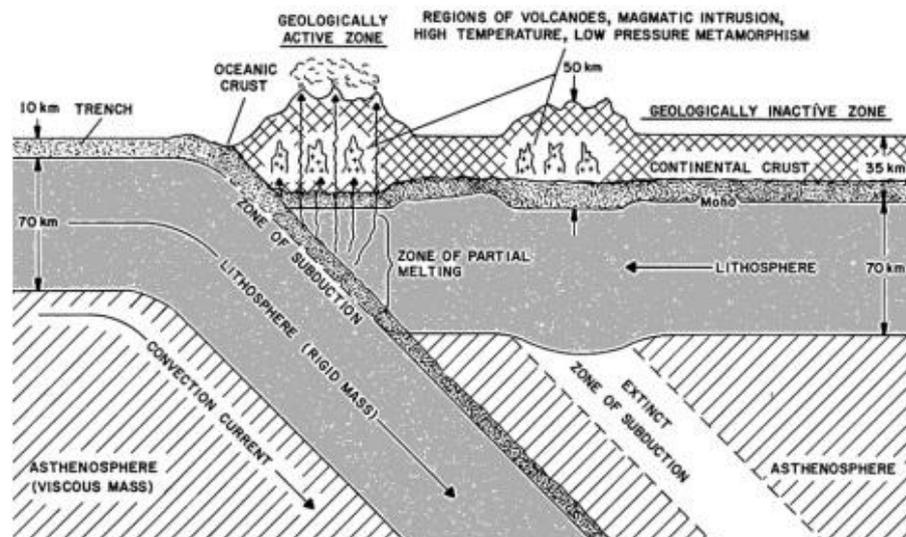


Gambar 10. Sistem Ideal Panas Bumi (Prihadi, 2010)

2. Model Geologi Panas Bumi

Kondisi geologi sumber-sumber panas bumi dunia sangat beragam. Pengelompokan geologi daerah panas bumi dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu sistem magmatik vulkanik aktif dan sistem selain magmatik vulkanik aktif. Sebagian besar sistem magmatik aktif memiliki temperatur yang tinggi (lebih dari 180°C) dan bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung (*direct use*) bisa diperoleh dari kedua sistem (Marini, 2000).

Sistem magmatik vulkanik aktif yang bertemperatur tinggi umumnya terdapat di sekitar pertemuan lempeng samudera dan lempeng benua. Posisi Indonesia berada di batas antara lempeng Eurasia dan Indo-Australia sehingga Indonesia memiliki potensi panas bumi yang cukup tinggi (Suparno, 2009).



Gambar 11. Penampang Vertikal Sistem Magnet Vulkanik Aktif (DiPippo, 2012)

Gambar 11 merupakan penampang vertikal geologi daerah magnet vulkanik aktif akibat tumbukan antara lempeng samudera (*oceanic crust*) dan

lempeng benua (*continental crust*) dimana lempeng samudera menunjam ke bawah lempeng benua. Temperatur yang sangat tinggi pada kerak bumi menyebabkan lempeng samudera meleleh. Lokasi lelehan (*zone of partial melting*) diperkirakan berada pada kedalaman 100 km dari permukaan bumi di antara kerak bumi dan bagian luar mantel bumi. Densitas lelehan akan lebih rendah dari sumbernya sehingga lelehan tersebut akan cenderung naik ke atas dan menjadi magma. Magma tidak pernah ditemukan dalam bentuk cair murni. Semua magma adalah lelehan batuan panas dengan campuran antara silikat cair, kristal mineral, gas karbondioksida serta senyawa beracun lainnya yang membentuk campuran kompleks. Magma saat mendekati permukaan bumi akan menyebabkan letusan vulkanik. Magma yang sudah keluar ke permukaan bumi disebut lava yang berupa lelehan batuan panas yang akan menjadi dingin secara perlahan dan membentuk batuan beku vulkanik di permukaan tanah. Magma yang bergerak ke atas pun bisa terjebak di dalam bumi dan perlahan-lahan menjadi dingin membentuk batuan beku sehingga komposisi magma dapat ditentukan dari komposisi batuan beku. Proses vulkanik melibatkan unsur-unsur gas yang terkandung dalam magma sehingga mengakibatkan komposisi batuan beku tidak selalu sama dengan komposisi magma aslinya (Suparno, 2009).

3. Manifestasi Panas Bumi

Suatu sistem hidothermal bawah permukaan di suatu wilayah seringkali ditunjukkan dengan adanya manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*). Beberapa manifestasi panas bumi adalah sebagai berikut:

1. Tanah hangat (*Warm Ground*)

Tanah hangat merupakan salah satu manifestasi panas bumi yang ditandai dengan adanya tanah yang memiliki temperatur lebih tinggi dari pada temperatur tanah di sekitarnya. Hal ini disebabkan karena adanya perpindahan panas secara konduksi dari batuan bawah permukaan ke batuan permukaan.

2. Tanah beruap (*Steaming Ground*)

Tanah beruap ditandai dengan adanya uap panas (*steam*) yang keluar dari dalam tanah. Uap panas ini berasal dari suatu lapisan tipis dekat permukaan yang mengandung air panas yang mempunyai temperatur yang sama atau lebih besar dari titik didihnya.

3. Mata air panas atau hangat (*Hot or Warm Spring*)

Mata air panas terbentuk akibat adanya aliran panas dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Gambar 12 menunjukkan mata air panas di Karangrejo.



Gambar 12. Mata Air Panas Karangrejo.

4. *Furamole*

Furamole adalah lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung air (*wet steam*). Apabila uap tersebut mengandung H₂S maka manifestasi permukaan disebut solfatara.

5. *Geyser*

Geyser adalah mata air panas yang menyembur ke udara secara *intermitten* (pada selang waktu tak tentu) dengan ketinggian tertentu.

6. Kubangan Lumpur Panas (*Mud Pools*)

Kubangan lumpur panas umumnya mengandung CO₂ dengan sejumlah kecil uap panas. Lumpur terdapat dalam keadaan cair karena kondensasi uap panas, sedangkan letupan terjadi karena pancaran CO₂.

7. Sinter Silika

Sinter silika merupakan endapan silika di permukaan yang memiliki warna keperakan. Sinter silika umumnya dijumpai di sekitar mata air panas dan lubang *geyser*.

8. Batuan Teralterasi

Alterasi hidrotermal adalah proses yang terjadi karena adanya reaksi antara batuan dengan fluida panas bumi (mengandung klorida) yang berasal dari reservoir panas bumi yang terdapat di bawah permukaan. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pengendapan dan pertukaran elemen-elemen batuan dengan fluida. Air yang bersifat asam mengubah batuan asal menjadi *clay* dan terlepasnya mineral-mineral lain.

F. Prinsip Kerja *Proton Precession Magnetometer* (PPM)

Proton Precession Magnetometer (PPM) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur medan magnet bumi berdasarkan terjadinya frekuensi precesi (frekuensi Larmor) dengan sensor berbentuk silinder dimana di dalamnya terisi cairan yang kaya akan proton. Proton ini berputar pada sumbunya (*spin*), sehingga menimbulkan suatu momen magnet lemah yang dipengaruhi dan diarahkan oleh medan magnet bumi di lokasi pengukuran.

Medan magnet yang kuat pada target pengukuran akan menyebabkan kedudukan momen magnet proton target akan bergeser dari posisi semula. Proton akan berpresesi dan berusaha kembali pada posisi semula jika medan magnet tersebut dihilangkan, sehingga menyebabkan munculnya frekuensi precesi yang dapat diukur untuk menentukan besar medan magnet yang mempengaruhi.

Gambar 13 menunjukkan prinsip kerja alat PPM dengan blok diagram kerja. Prinsip kerja tersebut didasarkan pada frekuensi precesi yang dihasilkan oleh momen gaya dan momentum sudut proton. Momen magnet yang disebabkan oleh sebuah proton yang berada dalam medan magnetik \vec{B} adalah:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (13)$$

hubungan antara momen magnet spin dan momentum sudut adalah:

$$\vec{\mu} = -\gamma \vec{I} \quad (14)$$

sehingga

$$\vec{\tau} = -\gamma \vec{I} \times \vec{B} \quad (15)$$

sedangkan momentum sudut menurut Hukum Newton didefinisikan sebagai:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{I}}{dt} \quad (16)$$

sehingga

$$d\bar{I} = -\gamma\bar{I} \times \bar{B}dt \quad (17)$$

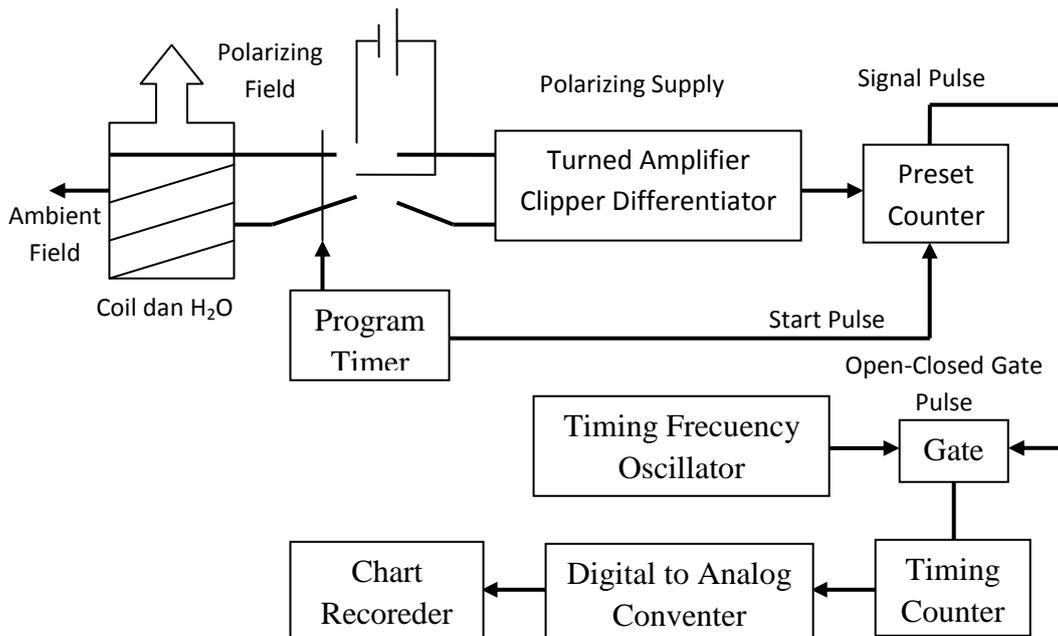
dengan $d\bar{I}$ tegak lurus terhadap \bar{B} sehingga besarnya \bar{I} adalah tetap dan selama perubahan waktu dt , \bar{I} bergerak sejauh $d\phi$.

$$d\phi = \frac{d\bar{I}}{\bar{I}\sin\phi} = \frac{\gamma\bar{I}\bar{B}\sin\phi dt}{\bar{I}\sin\phi} = \gamma\bar{B}dt \quad (18)$$

sehingga

$$\frac{2\pi f}{\gamma} = B \quad (19)$$

dengan γ adalah *gyromagnetic ratio* (23.4868 Hz/gamma), B adalah medan magnet, f adalah frekuensi presesi.



Gambar 13. Blok Diagram Kerja PPM (Fathonah, 2014).

G. Geologi dan Sistem Panas Bumi Karangrejo

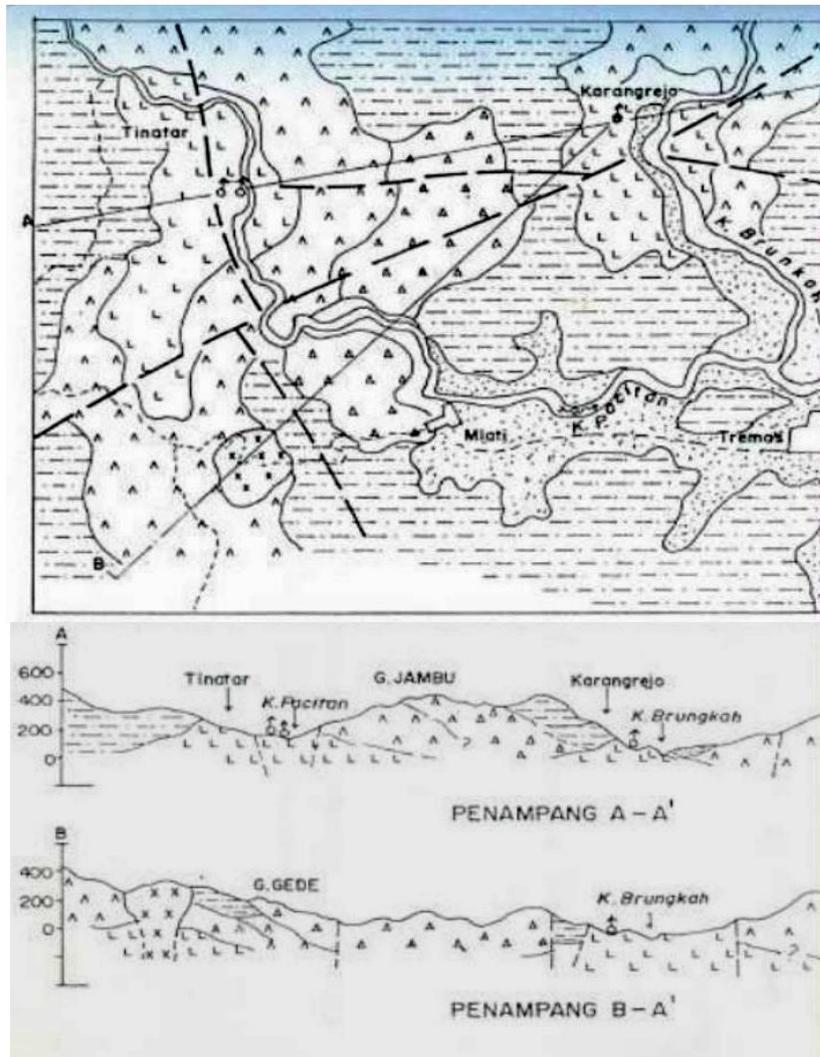
1. Struktur Geologi Karangrejo

Daerah Karangrejo memiliki struktur batuan dengan formasi Mandalika (Tomm) yang berumur Oligosen Akhir - Miosen Awal dengan ketebalan ± 300 m. Formasi Mandalika yang berupa perulangan menjari satuan breksi vulkanik, lava bantal, tufa, tufa dasitik dan batu pasir tufaan. Selain itu, daerah tersebut juga terdapat beberapa sesar dengan arah sebagai berikut (Abdullah *et al*, 2003) :

- a. Sesar-sesar yang berarah Timurlaut-Baratdaya (NE-SW) merupakan sesar mendatar mengiri turun, berjumlah empat buah dengan sesar utama adalah sesar Grindulu.
- b. Sesar-sesar yang berarah Utara-Selatan (N-S) merupakan sesar mendatar menganan (*dekstral*) turun berjumlah dua buah.
- c. Sesar-sesar yang berarah Utara-Selatan (N-S) merupakan sesar mendatar mengiri (*sinistral*) turun berjumlah tiga.
- d. Sesar-sesar yang berarah Baratlaut-Tenggara (NW-SE) merupakan sesar mendatar menganan turun berjumlah lima buah.

Batuan pada daerah Karangrejo termasuk dalam batuan tersier yang terdiri dari batuan gunung api tua yaitu lava dan breksi tufa yang berperan sebagai batuan dasar. Lava dan breksi tufa tersebar di bawah endapan sedimen klasik halus tufa dan sedimen klasik kasar yang terdiri dari breksi yang beragam jenis fragmennya. Selain itu, terdapat pula batuan terobosan yang berupa retas dan korak yang digolongkan ke dalam terobosan dasit. Terobosan dasit merupakan akhir dari kegiatan vulkanisme di pegunungan selatan yang berkaitan dengan

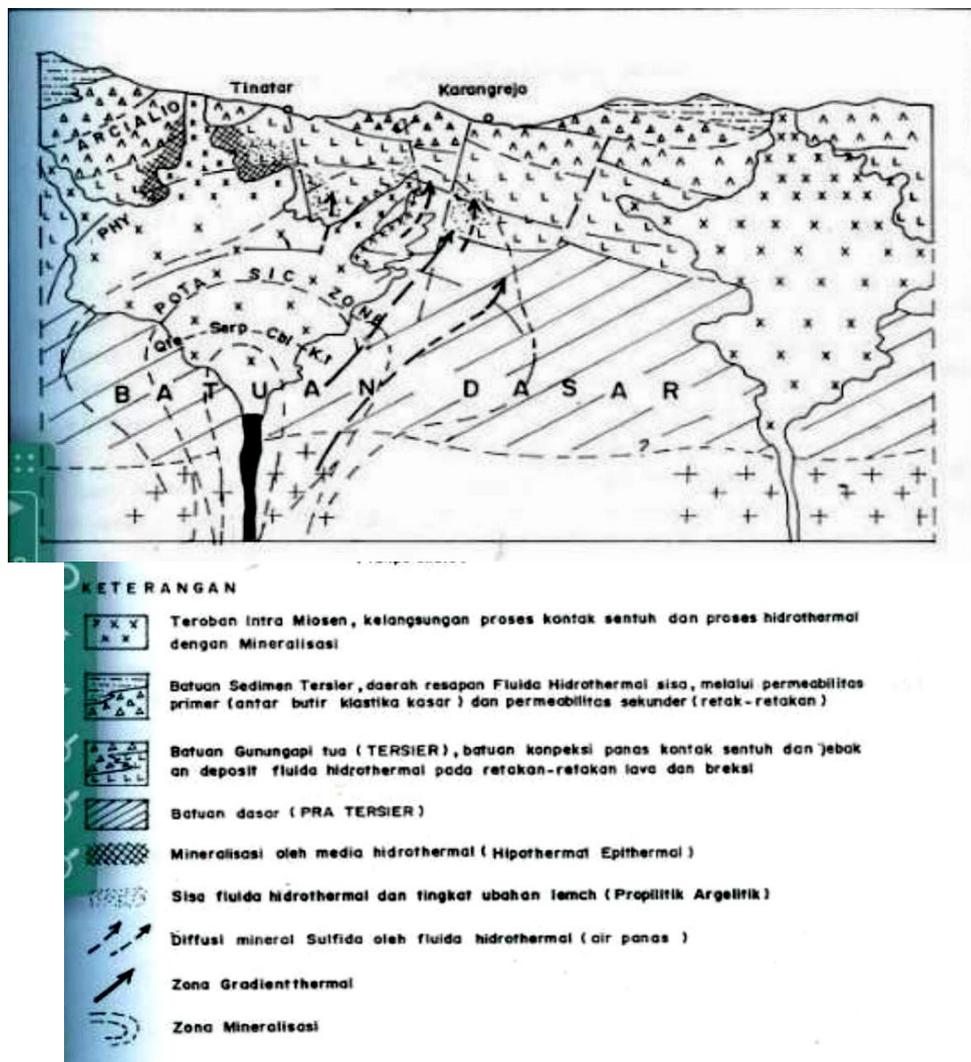
pembentukan mineralisasi pada batuan api tersier pada zaman Miosen Tengah (Akbar *et al*, 1993). Struktur bawah permukaan daerah Karangrejo ditunjukkan oleh Gambar 14.



Gambar 14. Penampang Struktur Bawah Permukaan Daerah Karangrejo (Akbar dkk, 1993).

2. Sistem Panas Bumi Karangrejo

Kenampakan panas bumi Karangrejo diakibatkan oleh permeabilitas primer yaitu melalui butiran atau fragmen antar batuan penyusunnya. Selain itu, adanya sesar di sekitar daerah panas bumi menjadi permeabilitas sekunder pada kemunculan air panas Karangrejo karena adanya retakan-retakan (*fracturing*) akibat sesar. Permeabilitas adalah kemampuan batuan untuk menyalurkan atau meloloskan fluida.



Gambar 15. Sistem Panas Bumi Karangerjo (Akbar *et al*, 1993)

Gambar 15 menunjukkan sistem panas bumi Karangrejo, dimana batuan yang berperan sebagai batuan dasar merupakan lava dan breksi tufa. Breksi tufa (Tmbt) yang berumur tersier atau Miosen atas berada di lapisan paling bawah dengan permeabilitas tinggi yang berperan sebagai media reservoir. Lapisan selanjutnya adalah tufa (Tms) yang memiliki permeabilitas rendah berfungsi sebagai batuan kedap air (*cap rock*) dan lapisan paling atas adalah endapan sedimen klasik yang dinyatakan sebagai breksi polimik. Batuan gunung api di daerah Karangrejo terlihat dari sebaran sisipan andesit pada endapan sedimen klasik. Batuan andesit (Toma) merupakan bagian dari kegiatan vulkanisme tertua pada zaman Miosen atas dan pada umumnya terdapat di sepanjang dasar sungai Grindulu dan sungai Pacitan (Akbar *et al*, 1993).

Daerah manifestasi panas bumi Karangrejo merupakan daerah panas bumi akibat adanya aktivitas gunung api, sehingga menyebabkan adanya batuan beku seperti dijelaskan sebelumnya. Tabel 1 memperlihatkan nilai suseptibilitas batuan beku secara umum, sehingga untuk mengidentifikasi batuan pada panas bumi masih membutuhkan informasi yang lebih detail. Tabel 3 dapat digunakan untuk mengidentifikasi batuan pada data lapangan karena Tabel 3 merupakan nilai batuan pada daerah panas bumi Bonjol yang muncul akibat aktivitas gunung api karena adanya kesamaan antara panas bumi Bonjol dan panas bumi Karangrejo, maka nilai suseptibilitas pada panas bumi Bonjol dapat dijadikan referensi untuk mengidentifikasi batuan panas bumi Karangrejo.

Tabel 3. Suseptibilitas Magnet Batuan di Daerah Panas Bumi Bonjol (Mustang *et al*, 2007)

Batuan	Satuan Batuan	Suseptibilitas (10^{-4}) cgs
Lava Andesit	Lava Tua	0.02-0.04
Breksi	Sedimen (Qs)	0.01-0.03
Alterasi Lempung	ALT LK	0.01-0.03
Andesit Piroksen	Piroklas	0.30-0.48
Bongkah Silifikasi	Piroklas	0.00-0.02
Aliran Piroklastik	Piroklas	0.02-0.11
Lava Dasitik	Lava BM	0.00-0.02
Andesit Piroksen	Laba BS	1.00-1.20
Andesit Terubah	Mineral Emas	0.07-0.11
Lempung Kaolin	Lava BM	0.00-0.02

H. Kerangka Pikir

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode geomagnet untuk mengetahui kondisi bawah permukaan bumi berdasarkan nilai suseptibilitas batuan. Metode ini didasarkan pada pengukuran variasi intensitas magnet di permukaan bumi yang disebabkan adanya distribusi benda termagnetisasi di bawah permukaan.

Identifikasi bawah permukaan suatu daerah dengan menggunakan metode geomagnet dilakukan dengan *Proton Precision Magnetometer* (PPM). Analisis datanya menggunakan hasil pemodelan dari *software* Mag2DC yang akan diinterpretasi dan dicocokkan dengan informasi geologi. Analisis tersebut diperoleh dengan terlebih dahulu mengolah data dengan melakukan koreksi agar didapatkan anomali lokal yang diinginkan, beberapa koreksi tersebut adalah koreksi topografi, koreksi variasi harian, koreksi IGRF, reduksi ke kutub dan kontinuitas ke atas.