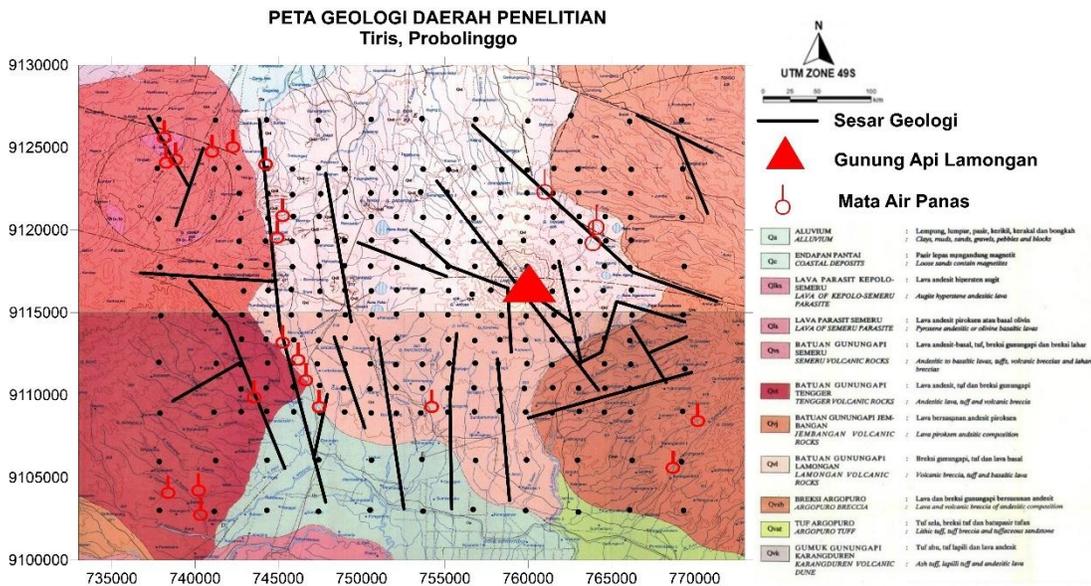




## 2.2 Geologi Daerah Penelitian

Probolinggo adalah sebuah daerah di Provinsi Jawa Timur. Kabupaten Probolinggo secara geologis terletak pada tempat  $7^{\circ} 40'$  sampai  $8^{\circ} 10'$  LS dan  $112^{\circ} 50'$  sampai  $113^{\circ} 30'$  BT dan memiliki luas wilayah 1.696,16 km<sup>2</sup>. Kabupaten Probolinggo di sebelah utara berbatasan dengan Selat Madura, di sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Situbondo, di sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Jember, dan di sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Pasuruan. Jika dilihat dari segi geologi, Kabupaten Probolinggo terletak pada lereng gunung yang membujur dari Barat ke Timur, yaitu Gunung Semeru, Gunung Argopuro, Gunung Tengger dan Gunung Lamongan. Kabupaten Probolinggo terletak pada ketinggian 0-2500 m di atas permukaan laut. Faktor ini membuat tanah menjadi tanah vulkanik yang banyak mengandung mineral yang timbul karena letusan gunung berapi seperti pasir dan batu, lumpur bercampur dengan tanah dengan warna kekuningan-gelap.. Gambar geologi wilayah penelitian Tugas Akhir ditunjukkan pada **Gambar 2.2** berikut.

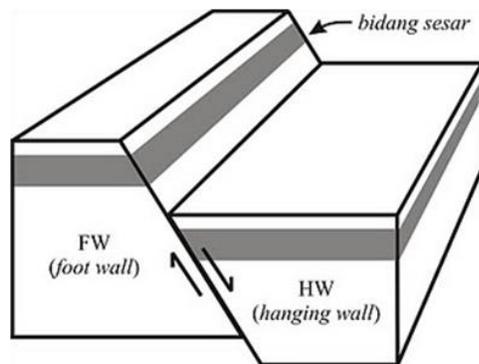


Gambar 2.2 Peta Geologi Daerah Penelitian

## 2.2 Sesar

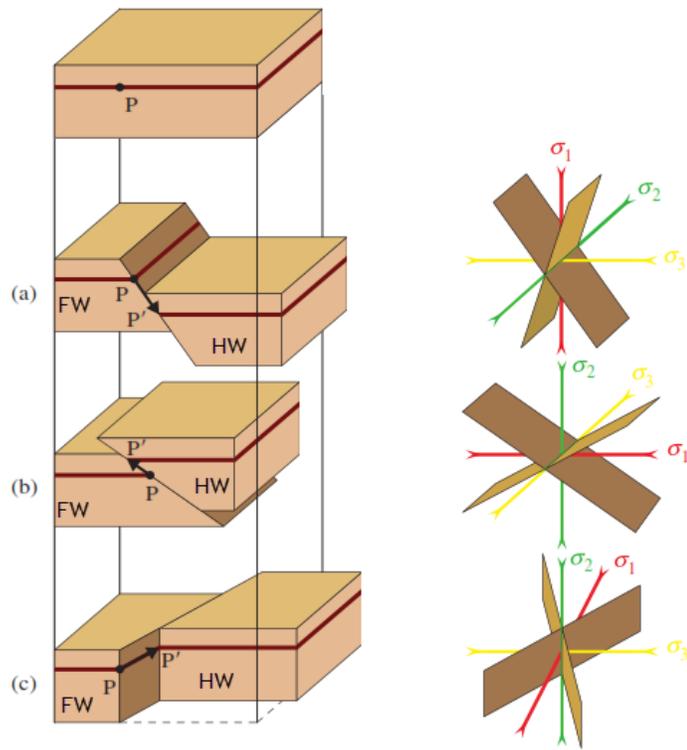
Rekahan pada lapisan batu yang menyebabkan satu kotak batu bergerak secara komparatif dengan yang lain adalah jenis patahan. Pergerakan ini umumnya bisa turun, naik atau sejajar merata sebanding dengan blok yang berbeda. Bidang rekahan

dan area rekahan yang tiba-tiba akan menyebabkan gempa. Daerah patahan atau zona retakan pada batuan yang telah mengalami pergeseran dikenal dengan istilah sesar/*fault* (Williams, 2004). Sesar/*fault* terbentuk pada retakan kerak bumi yang terdapat celah antara kedua sisi sesar. Karena kekuatan struktural yang dihasilkan ketika pergerakan lempeng misalnya, zona subduksi pada pertemuan dua lempeng struktural, seperti zona subduksi pada pertemuan dua lempeng tektonik akan memunculkan sesar dengan ukuran yang besar. Umumnya, sesar/patahan akan terjadi akibat karena gaya pada batuan (gaya yang menekan, gaya yang menarik, atau keduanya). Sebutan *hanging wall* dan *foot wall* digunakan untuk petunjuk segmen blok badan sesar penjelasan sesar. *Hanging wall* yaitu segmen tubuh batuan yang berada diatas bidang sesar. *Foot wall* yaitu segmen batuan yang berada dibawah bidang sesar, *Hanging wall* dan *Foot wall* ditunjukkan pada **Gambar 2.3** berikut:



Gambar 2 3 Hanging wall dan Foot wall (Williams, 2004)

Parriaux, (2018) mengklasifikasikan sesar menjadi bagian yang didasarkan pada arah gerak batuan dan gaya yang menjadi penyebab sesar, yakni sesar normal/*normal fault*, sesar naik/*reverse fault*, sesar mendatar/*strike slip fault*. ditunjukkan pada **Gambar 2.4** berikut:



Gambar 2.4 Sesar Normal, Sesar Naik dan Sesar Mendatar (Parriaux, 2018)

a. Sesar normal/*normal fault*

Sesar normal terbentuk karena tekanan gaya maksimum terhadap arah vertikal sampai akan mengakibatkan salah satu bidang batuan bergerak relatif ke bawah mengikuti arah bidang sesar. Sesar normal/*normal fault* umumnya berhubungan dengan perlipatan. Contohnya sesar di bagian bawah bumi kemudian tertukar menjadi lipatan monoklin diatas permukaan. *Hanging wall* akan turun pada bagian *foot wall*, bidang sesarnya memiliki nilai kemiringan yang cukup tinggi, sesar ini dikenal sebagai sesar turun/*normal fault*.

b. Sesar naik/*reverse fault*

Untuk sesar naik/*reverse fault* terbentuk karena *hanging wall* relatif naik terhadap bagian *foot wall*. Kemiringan dari sesar ini termasuk sudut kecil, berlainan dengan sesar turun yang mempunyai kemiringan sudut bisa mencapai vertikal adalah salah satu ciri sesar naik/*reverse fault*. Sesar naik terbentuk pada gaya maksimum yang berada pada batuan dengan arah horizontal. Batuan yang tertekan dengan gaya maksimum

mengakibatkan salah satu bagian batuan berarah ke atas. Sesar naik/ *reverse fault* umumnya terdapat pada area bertabrakan antara dua lempeng tektonik.

c. Sesar mendatar/*strike slip fault*

Sesar yang pembentukannya diakibatkan oleh tegasan kompresi disebut sesar mendatar/ *strike slip fault*. Letak dari tegasan awal pembentukan sesar ini yakni horizontal, persis letak tegasan minimum juga, untuk posisi tegasan arah tengah yakni vertikal. Biasanya bidang *strike slip fault* ditunjukkan dengan bidang arah vertikal, kemudian sebutan dari *foot wall* dan *hanging wall* tidak dipakai di dalam sesar mendatar. *Strike slip fault* bergerak secara vertikal namun dapat juga bergerak secara horizontal pada bidang batuan yang diakibatkan gaya yang berada pada batuan. Proses tersebut diakibatkan oleh gaya maksimum dan minimum mempunyai arah horizontal.

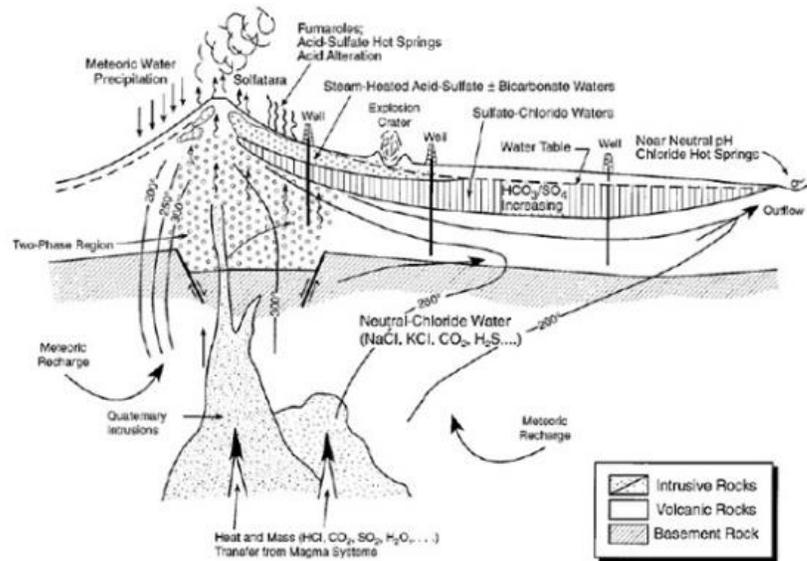
## **2.3 Panas Bumi**

Sumber energi *geothermal*/panas bumi adalah energi yang baik terhadap lingkungan dikarenakan bersumber pada panas dari dalam bawah bumi. Air yang dimasukkan ke bawah permukaan dengan sengaja atau alam (air hujan) akan terakumulasi di atas permukaan berbentuk uapan dan dapat dimanfaatkan dalam menggerakkan turbin sehingga mampu mendapat listrik. Eksplorasi dan modal pembangkit listrik tenaga panas bumi/*geothermal* memiliki biaya yang relatif tinggi dibandingkan pembangkit listrik lainnya yang memanfaatkan fosil. Meskipun, ketika mulai berproses biaya produksi akan jauh lebih kecil dibandingkan pembangkit listrik dari fosil.

### **2.3.1 Sistem Panas Bumi**

Sistem *geothermal* terdiri dari beberapa parameter yaitu: sumber panas, batuan *reservoir*, batuan penutup (*cap rock*), sumber fluida dan siklus hidrologi. Sistem ini erat kaitannya dengan mekanisme pembentukan magma dan aktivitas vulkanik. Oleh karena itu, sistem ini ada di lokasi tertentu, seperti sabuk vulkanik di sepanjang pegunungan, perluasan benua, zona subduksi ke atas dan lempeng. Panas yang dihasilkan oleh sistem dipindahkan ke tanah dengan cara: konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas melalui material akibat interaksi partikel penyusun batuan, sedangkan partikel batuan tanpa adanya perpindahan massa melakukan perpindahan

panas. Perpindahan panas setelah perpindahan massa partikel batuan disebut perpindahan panas konveksi. Pada saat yang sama panas yang dihasilkan oleh peluruhan alami elemen radioaktif di mantel adalah perpindahan panas radiasi. Penjelasan ini ditunjukkan pada pada **Gambar 2.5** berikut.



Gambar 2.5 Sistem Panas Bumi (Goff & Janik 2000)

### 2.3.2 Komponen Sistem Panas Bumi

Menurut penelitian Goff dan Janik (2000), batuan reservoir permeabel, keberadaan pembawa air dan sumber panasnya merupakan tiga komponen utama suatu sistem panas bumi. Komponen sistem panas bumi saling berkaitan hingga membentuk suatu sistem yang akan mentransfer energi panas dari bawah permukaan menuju permukaan bumi. Sistem panas bumi bekerja dengan mekanisme konduksi dan konveksi, Hochstein dan Brown (2000).

#### a. Sumber Panas

Sumber panas/*heatsource* merupakan komponen panas bumi yang memberikan panas dan menjadi dasar suatu daerah panas bumi yang baik (biasanya intrusi magma). Sumber panas bumi tidak hanya berasal dari hasil intrusi magma. Sumber panas mungkin bersumber pada pengangkatan batu dibawah permukaan yang panas atau dapat bersumber dari sirkulasi air tanah bawah permukaan, pemanasan terus menerus

terjadi oleh lipatan dan patahan. Umumnya, perbedaan sumber panas/*heatsource* bumi akan mengakibatkan perbedaan temperature reservoir panas bumi dan sistem panas bumi.

#### **b. Reservoir**

Karena batuan *reservoir* memiliki karakteristik porositas dan permeabilitas yang cukup baik, maka batuan tersebut merupakan batuan yang dapat menyimpan dan melewatkan *fluida* dalam jumlah yang banyak. Kecepatan pergerakan fluida ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik porositas dan permeabilitas. Komposisi kimiawi fluida panas bumi juga sangat mempengaruhi batuan *reservoir* karena fluida pada hidrotermal bereaksi terhadap batuan *reservoir* dalam mengubah sifat kimiawi fluidanya, (Di, dkk, 2014) menjelaskan bahwa bebatuan vulkanik, sedimen klastik dan karbonat akan mempengaruhi fluida dan menghasilkan sifat-sifat kimiawi berbeda pula.

#### **c. Fluida Panas Bumi**

Menurut (Nicholson, 1993) menjelaskan bahwa fluida panas bumi menjadi 4 bagian, yaitu:

1. Air meteorik atau Air Permukaan adalah air yang berasal dari lingkungan pengendapan atau hujan deras yang mengalir sejauh beberapa kilometer.
2. Air formasi atau air bawaan adalah air sementara yang terperangkap dalam perkembangan batuan sedimen dalam waktu yang cukup lama. Air bawaan melewati hubungan serius dengan batu yang membuat air menjadi lebih asin.
3. Air metaforik adalah air yang berasal dari perubahan yang tidak biasa dari air bawaan dari rekristalisasi mineral hidrat menjadi mineral kurang hidrat.
4. Air magmatik, (Ellis dan Mahon, 1997) memisahkan cairan magmatik menjadi dua macam, yaitu air magmatik khusus yang berasal dari magma namun sangat penting untuk air sementara dan air remaja yang tidak pernah penting untuk air yang cepat berlalu.

### **2.3 Teori Mengenai Metode**

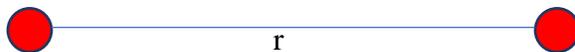
Metode magnetik didasarkan pada pengukuran perubahan intensitas medan magnet permukaan yang disebabkan oleh perubahan distribusi (suseptibilitas) benda-benda

bermagnet di bawah permukaan. Perubahan yang diukur (anomali) berada di latar belakang medan yang relatif luas. Menafsirkan perubahan kekuatan medan magnet yang diukur berdasarkan distribusi bahan magnet di bawah permukaan, dan kemudian menggunakannya sebagai dasar untuk memperkirakan kemungkinan kondisi geologi. Metode magnetik dan metode gravitasi memiliki latar belakang fisik yang sama, keduanya didasarkan pada teori energi potensial. Namun, dalam hal besaran fisik yang terlibat, ada perbedaan mendasar antara keduanya. Data observasi magnetik menunjukkan sifat residual yang lebih kompleks. Oleh karena itu, metode magnet mempunyai perbedaan yang lebih besar terhadap waktu. Pengukuran nilai medan magnet dapat dilakukan dengan eksplorasi darat, laut dan udara. Metode magnet umumnya dipakai dalam *survey* awal migas, panas bumi/*geothermal* hingga logam-logam mineral, dan dapat digunakan untuk mengeksplorasi benda-benda arkeologi.

Metode magnetik adalah metode penggunaan kemagnetan bumi dalam geofisika. Dengan metode magnet, didapatkan profil yang menjelaskan distribusi kerentanan bebatuan dalam bumi berarah horizontal. Berdasarkan tingkat suseptibilitas magnetnya dapat diposisikan dari bebatuan yang berisi magnet dan tidak. Untuk *survey* ini hanya tepat digunakan dalam pemodelan pada arah horizontal/mendatar, sehingga dalam mencari informasi kedalaman diperlukan metode resistivitas 2D. Oleh karena itu, dilakukan pengukuran magnet Berlaku untuk area yang luas, tujuannya adalah untuk menemukan area potensial. Setelah mendapatkan luas yang diharapkan, dilakukan pengukuran resistivitas 2D.

### 2.3.1 Gaya Magnetik

Gaya magnetik adalah gaya tarik menarik atau tolak menolak pada dua muatan magnetik seperti ditunjukkan oleh **Gambar 2.6** dibawah.



Gambar 2 6 gaya tarik menarik atau tolak menolak pada dua muatan magnetik

Gaya Coulomb menjelaskan gaya magnetik banding terbalik dengan kuadrat jarak antar dua muatan magnetik dengan persamaan tidak jauh berbeda dengan hukum

Newton. Gaya magnet dihasilkan oleh dua buah kutub berjarak  $r$  dan memiliki muatan kutub  $\rho_1$  dan  $\rho_2$ , dapat dirumuskan sebagai berikut ini:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\rho_1 \rho_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$\vec{F}$  = Gaya Coulomb (N)

$r$  = jarak antar kutub  $\rho_1$  dan  $\rho_2$  (m)

$\hat{r}$  = vektor satuan

$\rho_1$  dan  $\rho_2$  = kuat kutub (C)

$\mu_0$  = Permeabilitas

### 2.3.2 Kuat Medan Magnetik

Kekuatan nilai medan magnet merupakan besarnya medan magnet pada sebuah titik dalam ruang yang terjadi akibat satu kutub yang berjarak  $r$  dari titik tersebut. Kekuatan medan magnet ( $\vec{H}$ ) pada sebuah titik dengan jarak  $r$  dari  $\rho$  didefinisikan dengan gaya per satuan kuat kutub magnet, sehingga dirumuskan sebagai berikut:

$$H = \frac{F}{\rho} \quad (2.2)$$

Dimana  $H$  adalah kekuatan medan magnet yang diukur. Jika benda diinduksi oleh medan magnet  $H$ , maka intensitas medan magnet yang dialami oleh benda tersebut adalah (Reynold, 1995).

### 2.3.3 Momen Magnetik

Kuantitas yang mendeskripsikan kekuatan magnetik pada keseluruhan objek.

$$m = MV \text{ atau } m = \rho l \quad (2.3)$$

Keterangan:

$\rho$  = muatan kutub

$l$  = jarak

$m$  = momen magnetik

### 2.3.4 Intensitas Magnetisasi

Jika suatu bagian magnetik ada dalam suatu medan magnetik luar, bagian magnetik tersebut akan termagnetisasi dengan proses induksi. Nilai dan arah magnetisasi/kemagnetan bagian magnetik adalah berbanding lurus dengan kekuatan dan arah medan magnetik yang menginduksi. Nilai kemagnetan didefinisikan sebagai momen magnet per satuan volume, sebagai berikut:

$$I = k \cdot \vec{H} \quad (2.4)$$

Keterangan:

k = Momen magnet (Dalam satuan SI)

I = Intensitas magnetisasi (T)

$\vec{H}$  = Kuat medan magnet (T)

### 2.3.5 Suseptibilitas Batuan

Suseptibilitas bebatuan adalah tingkatan nilai magnet suatu bahan untuk termagnetisasi. Nilai yang terpengaruhi oleh nilai suseptibilitas adalah litologi bebatuan dan kandungan mineral bebatuan, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\chi = \frac{I}{H} \quad (2.5)$$

Keterangan:

M = Intensitas magnetisasi (T)

$\chi$  = Suseptibilitas magnetik (Dalam satuan SI)

H = Kuat medan magnetik (T)

Tabel 2 Tabel nilai Suseptibilitas Batuan dan Mineral (Telford,1990)

<b>Type Batuan</b>	<b>Suseptibilitas x 10<sup>-3</sup>(SI)</b>
Dolomite	0 – 0,9
Limestones	0 – 3,0
Sandstones	0 – 20
Shales	0,01 – 15
Amphibolite	0,7
Schist	0,3 – 3,0
Phyllite	1,5
Gneiss	0,1 – 25
Quartzite	4,0
Serpentine	3 – 17
Granite	0 – 50
Rhyolite	0,2 – 35
Dolorite	Jan-35
Diabase	1 – 160
Porphyry	0,3 – 200
Gabbro	Jan-90
Basalts	0.2 - 175
Diorite	0.6 - 120
Peridotite	90 - 200
Andesite	160
<b>Type Mineral</b>	<b>Suseptibilitas x 10<sup>-3</sup>(SI)</b>
Graphite	0.1
Quartz	-0.01
Rock salt	-0.01
Gypsum	-0.01
Calcite	-0,001 – 0,01
Coal	0.02
Clays	0.2
Chalcopyrite	0.4
Siderite	1 – 4
Pyrite	0,05 – 5
Limonite	2,5
Hematite	0,5 – 35
Chromite	3 – 110
Ilmenite	300 – 3.500
Magnetite	1.200 – 19.200

### 2.3.6 Induksi Magnetik

Pertama yang ditangkap adalah fluks magnetik. Fluks magnetik adalah jumlah medan magnet  $B$  yang melewati luas penampang tertentu.

$$\phi = B.A \quad (2.6)$$

Dari fluks magnetik akan didapatkan induksi medan magnetik ( $B$ ). Induksi medan magnetik merupakan kekuatan medan magnetik akibat terjadinya arus listrik yang mengalir pada benda konduktor.

$$B = \mu.H \quad (2.7)$$

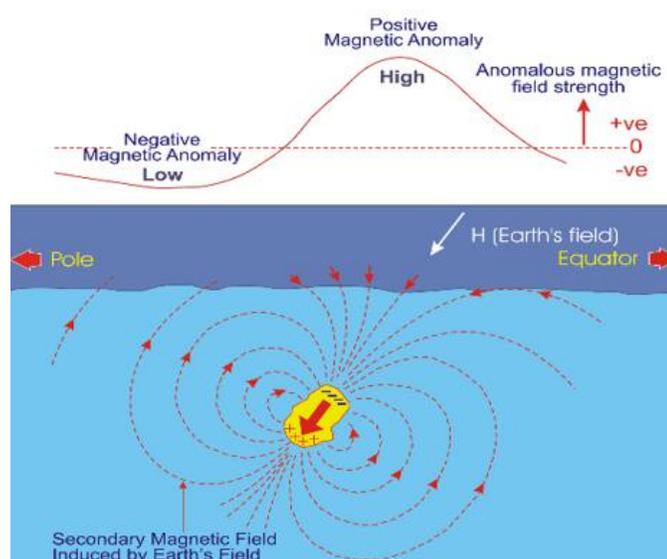
Keterangan:

$\phi$  = fluks magnetik

$B$  = Induksi medan magnetik

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

Induksi magnetik merupakan proses dimana bahan magnetik dapat termagnetisasi oleh medan magnet utama dan ditunjukkan oleh **Gambar 2.7** dibawah:



Gambar 2.7 Induksi magnetik (Survey & Park, 1976)

### 2.3.7 Bumi Sebagai Magnet

Bumi dimisalkan dengan magnet besar dan medan magnet menarik yang melingkarinya. Medan magnet diciptakan oleh dipol atraktif yang terletak di titik fokus bumi. Pada titik manapun, medan bumi dicirikan oleh arah dan intensitas yang dapat diukur. Parameter yang diukur adalah deklinasi magnetik ( $D$ ) dan inklinasi magnetik ( $I$ ). Deklinasi adalah sudut yang terbentuk diantara utara medan magnet dan sudut utara geografis sedangkan inklinasi adalah sudut yang terbentuk oleh medan total magnetik dan bidang horizontal diperhitungkan dari bidang horizontal kearah vertikal kebawah.

Medan magnet yang diukur adalah kombinasi dari beberapa medan magnet yang dihasilkan oleh berbagai sumber. Sebesar 90% medan magnet dihasilkan oleh proses internal bumi atau dikenal dengan medan utama ( $H_m$ ). Sisanya dihasilkan oleh kerak bumi ( $H_a$ ) dan proses eksternal ( $H_e$ ). Sehingga akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$H_t = H_m + H_a + H_e \quad (2.8)$$

Keterangan

$H_t$  = Medan magnet total bumi (nT)

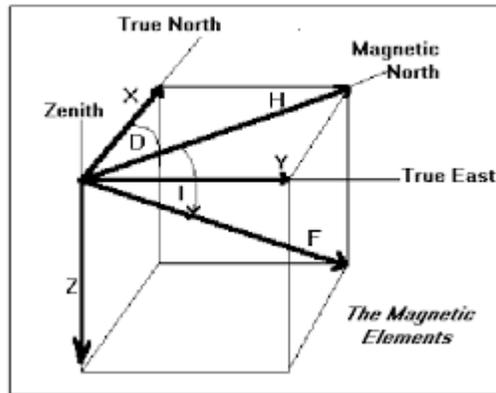
$H_m$  = Medan magnet utama bumi (nT)

$H_a$  = Medan anomali magnet (nT)

$H_e$  = Medan magnet eksternal (nT)

Hubungan antara komponen-komponen magnet bumi pada **Gambar 2.8** menunjukkan elemen magnet bumi  $F$  dari persamaan:

$$H = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$$
$$F = \sqrt{(H^2 + Z^2)} = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} \quad (2.9)$$



Gambar 2 8 Elemen Magnet Bumi (Telford, 1990)

### 2.3.8 Sifat Kemagnetan Bahan

Untuk bukti geomagnetik yang dapat dikenali, teknik geomagnetik bergantung pada kontras dalam sifat-sifat batuan yang menarik. Dimana batuan mengalami kenaikan *Temperature Curie* ( $T_c$ ) dengan tujuan batu tersebut akan mengalami penurunan daya tarik (demagnetisasi). Sebagian besar suhu *Curie* akan meningkat pada batuan yang mengandung titano-menarik sebagai penyusun mineral atraktif, sehingga digunakan sebagai penunjuk dalam pembuktian suhu *Curie* yang dapat dikenali pada kedalaman yang cukup besar (Blakely, 1995 dalam Syamsurijal 2011). Hubungan suseptibilitas magnetik ( $k$ ), dengan temperature menurut sifat magnetik batuan, yakni (Rosanti, 2010):

1. *Ferromagnetik* merupakan benda magnetik yang mudah mengalami magnetisasi memiliki besar  $k$  positif dan tinggi, yaitu  $k < 0$ , dan  $k \gg 1$ . Pada saat  $T < T_c = \text{Temperature Curie}$ , maka daerah ini dikatakan daerah *Ferromagnetik*. *Ferromagnetik* tergantung dengan suhu, pada suhu yang turun maka nilai  $k$  kemudian bertambah, sedangkan ketika temperature Curie maka nilai  $k$  menghilang. *Ferromagnetik* dibagi menjadi 2 yakni:

- a. *Ferrimagnetik* merupakan benda magnetik yang memiliki nilai  $k$  yang tinggi bergantung dengan suhu, tapi jauh lebih rendah dibandingkan bahan *Ferromagnetik*.
- b. *Antiferromagnetik* merupakan bahan magnetik yang memiliki nilai  $k$  kecil yakni hampir sama nilai  $k$  pada benda *paramagnetik*. *Antiferromagnetik* tergantung pada

suhu, nilai  $k$  akan naik pada saat kenaikan suhu dengan titik *Curie* dan akan turun pada suhu tertentu.

2. *Paramagnetik* merupakan bahan magnetik yang mudah termagnetisasi mempunyai nilai  $k$  kecil dan positif, yaitu  $k > 0$ , dan  $k \ll 1$ . Pada saat  $T > T_c$  maka daerah ini dikatakan daerah *Paramagnetik*. *Paramagnetik* memiliki nilai  $k$  berbenading terbalik dengan suhu.

3. *Diamagnetik* adalah bahan yang memiliki nilai  $k$  kecil dan negatif, yaitu  $k < 0$ . Semua benda secara teoritis bersifat *Diamagnetik* pada temperature yang relatif tinggi.

*Curie Point Depth (CPD)* dicirikan sebagai kedalaman suhu *Curie* di mana bahan yang menarik kehilangan sifat atraktifnya. Suhu *Curie* umumnya lebih tinggi di batuan vulkanik mafik daripada di batuan yang berbeda, karena kualitas titano-attractive yang lebih tinggi yang terkandung. CPD secara langsung dipengaruhi oleh suhu batu di bawah permukaan karena latihan struktural. Batuan biasanya dikenali tergantung pada zat mineral, senyawa dan sifat sebenarnya berdasarkan permukaan, susunan, sintesis dan interaksi perkembangan batuan. Salah satu jumlah aktual yang dimanfaatkan dalam karakterisasi batuan adalah sifat menarik dan kelemahan batuan (Milsom dalam Syamsurijal, 2011).

### 2.3.8 Koreksi Harian

Koreksi harian merupakan penyimpangan intensitas medan magnet yang diakibatkan karena perbedaan saat pengukuran dan pengaruh sinar matahari dalam suatu hari. Koreksi harian merupakan koreksi yang dibuat terhadap data magnetik terukur dalam menghilangkan efek medan magnet eksternal dan variasi harian, koreksi harian dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$H_d = \frac{(t_n - t_{aw})}{(t_{ak} - t_{aw})} (H_{ak} - H_{aw})$$

Keterangan:

$t_n$  : t pada titik n

$t_{aw}$  : t awal

*tak* : t akhir

*Hak* : Nilai medan magnet di titik akhir

*Haw* : Nilai medan magnet di titik awal

### 2.3.8 Koreksi IGRF

Penyesuaian *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)* dilakukan dengan memastikan nilai medan tarik titik estimasi dengan nilai saat ini di IGRF. Sebelum membuat nilai bidang atraktif IGRF, ubah arah UTM ke jenis bujur dan ruang lingkup. Perubahan ini karena dalam menentukan harga Higrf maka, pada saat itu memasuki arah sebagai garis bujur dan ruang lingkup. Kondisi pemulihan (setelah perbaikan hari demi hari dan IGRF) diklarifikasi dengan kondisi numerik yang menyertainya:

$$\Delta H = H_{total} \pm H_{harian} \pm \Delta H_{igrf} \quad (2.10)$$

Keterangan:

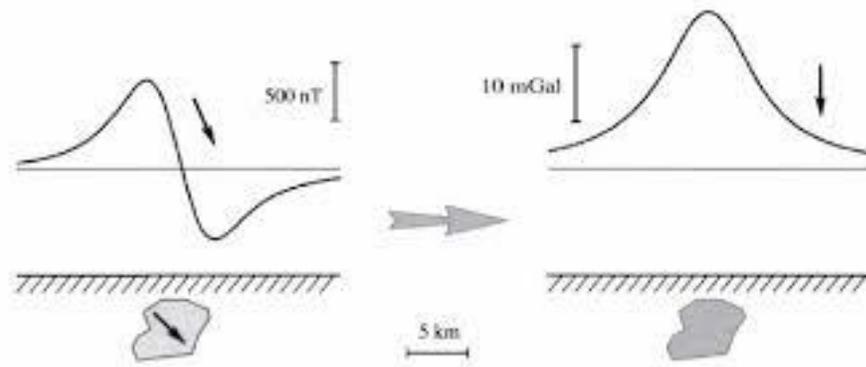
*Htotal* = Medan magnet total

*Hharian* = Medan magnet koreksi harian

Setelah semua koreksi dilakukan terhadap medan magnet yang diukur di lapangan, akan didapatkan nilai anomali Medan Magnet Total. Dalam mengetahui pola anomali didapatkan, kemudian digunakan model geologi struktur bawah permukaan sebagai dasar identifikasi. Pola kontur terdiri atas garis-garis kontur yang menghubungkan titik-titik yang mempunyai nilai anomali yang sama, yang terukur dalam suatu bidang perbandingan tertentu.

### 2.3.9 Reduksi Ke Kutub

Baranov dan Naudy (1964) memupuk strategi perubahan kutub untuk membuat pemahaman informasi lapangan yang menarik di daerah lingkup rendah dan pusat lebih mudah. Strategi penurunan ke poros akan mengurangi langkah sulit dalam interpretasi, dimana anomali medan magnet menjelaskan keberadaan benda sebagaimana ditunjukkan oleh **Gambar 2.9** berikut.



Gambar 2 9 Anomali magnet (kiri) dan anomali hasil reduksi ke kutub (kanan) (Blakely,1995)

Proses reduksi dilakukan dengan merubah sudut inklinasi dengan sudut deklinasi jadi  $90^\circ$  dan  $0^\circ$ . Formulasi umum sebagai hubungannya dengan medan potensial ( $\bar{f}$ ) dan distribusi bahan sumber (s) ditunjukkan dengan persamaan dibawah:

$$\mathcal{F}[\Delta T_r] = \mathcal{F}[\Psi_r]\mathcal{F}[\Delta T] \quad (2.11)$$

Keterangan:

$\mathcal{F}[\Delta T_r]$  = Hasil anomali magnetik RTP

$\mathcal{F}[\Delta T]$  = Anomali magnet

$\mathcal{F}[\Psi_r]$  = Reduksi Ke Kutub

Proses transformasi reduksi ke kutub dilakukan dengan mengubah arah magnetisasi dan medan utama dalam arah vertical.

### 2.3.10 Kontinuasi Ke Atas

Kontinuasi ke atas (*upward continuation*) adalah pendekatan untuk menghapus anomali lokal. Kepastian tingkat perkembangan diselesaikan dengan eksperimen dengan melihat pola contoh bentuk hasil koherensi. *Rule of up coherence* adalah bahwa suatu medan atraktif potensial dapat ditentukan kapan saja di suatu area tergantung pada sifat-sifat permukaan yang dicakup oleh distrik tersebut. Koherensi naik dilakukan dengan mengubah medan potensial yang diperkirakan pada permukaan tertentu menjadi medan yang mungkin pada permukaan yang lebih jauh dari sumbernya.

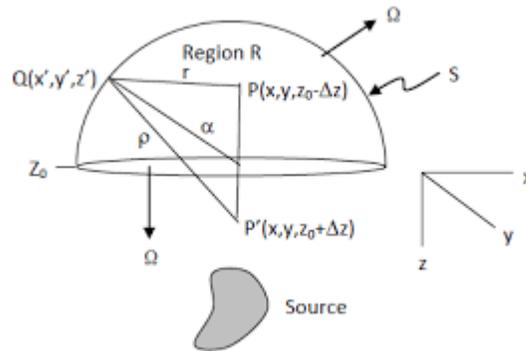
Konsep dari kontinuitas keatas bersumber pada hukum ketiga teorema Green, Teorema Green menerangkan jika suatu fungsi U yaitu harmonik, kontinu sehingga memiliki turunan yang kontinu di area R dan nilai U pada titik P di dalam daerah R. **Gambar 2.10** menjelaskan konsep dasar kontinuitas ke atas dan dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int S \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (2.12)$$

Keterangan:

n = arah anomali keluar

r = jarak dari titik P ke suatu titik pada permukaan S



Gambar 2 10 Kontinuitas ke Atas dari permukaan horizontal (Blakely,1995)

Dalam sistem koordinat kartesian, dengan sumbu z arah bawah, diibaratkan bahwa medan potensial terukur pada permukaan  $z = z_0$  dan medan terletak dalam suatu titik  $P(x, y, z_0 - \Delta z)$  yang berada di atas permukaan S dimana  $\Delta z > 0$ . Sumber anomali ada pada  $z > z_0$  apabila  $\alpha$  menjadi tinggi, sehingga integrasi persamaan kontinuitas di bagian hemispare menjadi rendah. Sehingga, jika  $\alpha$  menjadi tak terhingga, maka persamaannya menjadi berikut:

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial U(x, y, z_0 - \Delta z)}{\partial z} - U(x, y, z_0 - \Delta z) \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \right) dx' dy' \quad (2.13)$$

$$\text{Dengan } r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \text{ dan } \Delta z > 0 \quad (2.14)$$

### 2.3.11 Filter Gaussian

Proses pemisahan anomali dan regional dilakukan dengan cara untuk mengisolasi keanehan lokal dari ketidakteraturan sisa diselesaikan di ruang pengulangan. Dalam standar numerik, siklus ini memungkinkan untuk mengisolasi inkonsistensi mengingat fakta bahwa artikel bawah permukaan akan menghasilkan reaksi abnormal yang tinggi dan rendah. Filter Gaussian adalah saluran langsung yang menggunakan penyampaian informasi dalam kerangka bagian Gaussian yang dapat disusun secara numerik sebagai berikut:

$$G(i, j) = c \cdot e^{-\frac{(i - u)^2 + (j - v)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$G(i, j)$  = Matriks karnel

$c$  = Konstanta

$i, u, j$  dan  $v$  = anggota di dalam matriks

$\sigma$  = Suatu konstanta yang disesuaikan dengan ukuran matriks karnel Gauss

Selanjutnya matriks karnel tersebut dikonvolusikan terhadap matriks data yang sudah berada dalam kawasan frekuensi.

### 2.3.12 Second Vertical Derivative (SVD)

*Second Vertical Derivative (SVD)* bersifat sebagai *high pass filter*, berjalan sebagai saluran lulus tinggi, sehingga dapat menggambarkan penyimpangan sisa terkait dengan konstruksi dangkal yang dapat digunakan untuk membedakan kekurangan yang meningkat atau kekurangan menyelam. Teknik ini digunakan untuk menghasilkan mata air abnormal yang dangkal/dekat. Teknik ini sangat baik untuk mengetahui keruntuhan suatu desain bawah permukaan, terutama adanya kekurangan-kekurangan pada suatu wilayah eksplorasi. Secara hipotesis strategi ini didapat dari kondisi Laplace

untuk keanehan atraktif pada level superfisial yang kondisinya dapat disusun sebagai berikut:

$$\nabla^2 \Delta H = 0 \text{ dimana}$$

$$\nabla^2 \Delta H = \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial z^2} \quad (2.16)$$

Sehingga persamaanya menjadi berikut:

$$\frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial z^2} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial z^2} = - \left[ \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial y^2} \right] \quad (2.18)$$

Berdasarkan persamaan diatas menerangkan *Second Vertical Derivative* (SVD) dari peta anomali magnetik permukaannya yaitu berbanding lurus negatif *derivative* dan melalui *derivative* orde kedua horizontal akan relatif mudah dipahami. *Second Vertical Derivative* memiliki sifat *highpass filter*, kemudian akan menggambarkan peta anomali residual yang berhubungan dengan struktur dekat permukaan.

$$\frac{\partial^2(\Delta H)}{\partial z^2} = |k|^2 Hz \text{ dengan } |k|^2 = kx^2 + ky^2 \quad (2.19)$$

Keterangan:

$Hz$  = Fourier transform dari  $\Delta H$

$kx$  dan  $ky$  = Bilangan gelombang dalam sumbu  $x$  dan  $y$ .

### 2.3.13 Inverse Modelling

Metode inversi umumnya dipakai dalam mengestimasi model respon magnetik yang paling sesuai dengan data hasil perhitungan. Dalam menyesuaikan data, kemudian dibuat dalam suatu fungsi objektif yaitu fungsi selisih dari data teoretis dan

observasional. Semua data anomali magnetik didapatkan di atas permukaan kemudian diukur dengan menghitung proyeksi anomali dari medan magnet. Sumber di lokasi yang diteliti diatur ke dalam sel dalam bentuk mesh 3 dimensi (Li dan Oldenburg, 1996). Jaring 3 dimensi diperkirakan memiliki kerentanan untuk setiap sel selanjutnya magnet remanen diabaikan. Anomali magnetik ( $\Delta T$ ) suatu daerah berkaitan dengan nilai suseptibilitas ( $k$ ) di bawah bumi. Secara linear kemudian dirumuskan menjadi persamaan berikut:

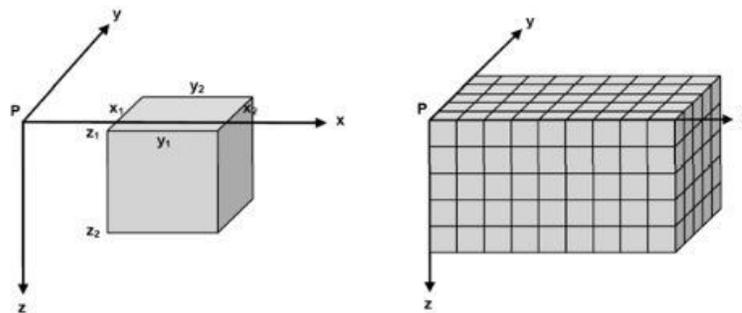
$$d = Gm \tag{2.20}$$

$$m = G^T(G.G^T)^{-1}d$$

Dimana  $G$  merupakan matriks dengan ukuran  $i \times j$

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{1j} \\ G_{22} & G_{22} & G_{2j} \\ G_{i1} & G_{i2} & G_{ij} \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

Matriks  $G$  dimanfaatkan dalam memetakan model seluruh data pada proses inversi,  $i$  merupakan jumlah data dan  $j$  merupakan jumlah parameter model. Umumnya, inversi yang dibuat dalam data anomali sebanding dengan perbedaan nilai suseptibilitas dalam linear. Data observasi ada di atas permukaan pada bidang  $x$  dan  $y$ . **Gambar 2.11** menjelaskan di bagian kiri untuk menghitung respon magnetik pada titik  $P$ , keadaan kubus sama sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$  yaitu  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  dan bagian kanan merupakan diskritisasi medium 3D jadi susunan kubus pada geometri homogen.



Gambar 2.11 Geometri model 3D prisma tegak atau kubus (Grandis,2009)

## **2.4 Penelitian Yang Pernah Dilakukan**

### **1. Pemodelan Magnetotelurik 1D pada Model Litologi Panasbumi Tiris, Probolinggo**

(Putri, 2017) melakukan studi pemodelan 1D magnetotelurik di daerah panasbumi Tiris, Probolinggo. Penelitian ini menggunakan data dari hasil dari identifikasi litologi batuan di daerah panasbumi, Tiris, Probolinggo. Penelitian tersebut dilanjutkan dengan menggunakan metode magnetotelurik 1D yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh resistivitas bumi dan kedalaman dengan respon pemodelan magnetotelurik 1D dan sebagai studi awal untuk mengetahui kemungkinan metode magnetotelurik dapat digunakan pada daerah yang telah diteliti menggunakan metode magnetotelurik, dengan menentukan nilai resistivitas lapisan dan ketebalan lapisan. Metode penelitian ini menggunakan teknik forward modelling yang dimulai dengan menentukan model resistivitas berdasarkan model litologi data magnetik. Data magnetik tersebut terdiri dari 3 lintasan yaitu sayatan A-A', B-B' dan C-C'. Setiap sayatan tersebut ditentukan beberapa titik yang diambil secara horozontal, sehingga dapat diketahui variasi dari jenis batuan dan ketebalan batuan. Setelah nilai resistivitas batuan dan ketebalan ditentukan kemudian menghitung respon magnetotelurik 1D pada frekuensi  $10^{-1}$  Hz sampai  $10^{-3}$  Hz. Respon pemodelan magnetotelurik 1D adalah kurva hubungan antara resistivitas semu dengan frekuensi dan data fasa impedansi dengan frekuensi. Kurva tersebut kemudian dianalisa dan dibandingkan pada setiap titik.

### **2. Estimasi Distribusi Termal dan Struktur Bawah permukaan dengan Pemodelan Densitas dan Suseptibilitas 3D**

(Suprianto et al., 2020) melakukan studi geofisika dengan menggunakan gaya *gravity* dan magnetik pada sumber panas bumi Tiris di Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. Total data *gravity* dan magnetik yang digunakan pada penelitian ini adalah 139 titik, spasi data gravitasi dan magnetik bervariasi antara 250 sampai 750 meter. Data gravitasi dari pengukuran lapangan kemudian dikoreksi untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly (CBA)* sedangkan data magnetik dari hasil pengukuran kemudian dikoreksi untuk mendapatkan medan magnet total yang digunakan selanjutnya untuk

proses inversi untuk mendapatkan model suseptibilitas bawah permukaan. Anomali medan magnet dan anomali bouguer lengkap kemudian dibuat dalam peta Anomali Bouguer Lengkap (CBA), anomali medan magnet total di wilayah penelitian ini bernilai antara -900 hingga 1300 nT, sedangkan anomali medan gravitasi memiliki nilai antara -230 hingga 30 mGal.

### **3. Identifikasi Jenis Batuan Bawah Permukaan Daerah Panas bumi Tiris Dengan Metode Geolistrik**

(Istighfaroh et al., 2013) memperkirakan potensi panas bumi bawah tanah di kawasan Tiris Probolinggo yaitu menentukan perubahan tingkat resistivitas batuan dan struktur strata dibawah tanah serta mengidentifikasi pola sebaran aliran. Cairan termal. Metode resistivitas tanah struktur dipol-dipol digunakan untuk mengumpulkan data pada 4 titik jalur penelitian. Hal ini dapat dilihat dari pengolahan data 2D bahwa hasil pengolahan data dan interpretasi resistivitas tanah wilayah panas bumi Tiris menunjukkan bahwa batuan jalur 1 tersebar antara  $0,80\Omega\text{m}$  dan  $14245\Omega\text{m}$ , serta litologi bawah tanah, pasir, dan sudut vulkanik diidentifikasi dalam bentuk tanah liat, konglomerat, tufa, lava dan basal. Antara  $0,80\Omega\text{m}$  dan  $870\Omega\text{m}$ , dengan tanah liat, pasir, Breksi dan tufa vulkanik. Pada Jalur 3 antara  $0,80\Omega\text{m}$  dan  $870\Omega\text{m}$  juga ditemukan litologi bawah tanah berupa batulempung, pasir, breksi vulkanik dan tufa. Garis 4 berada diantara  $0,80\Omega\text{m}$  dan  $14245\Omega\text{m}$ , mengidentifikasi litologi bawah tanah berupa batulempung, pasir, breksi vulkanik, tufa, lava dan basalt.