

BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Geologi Regional

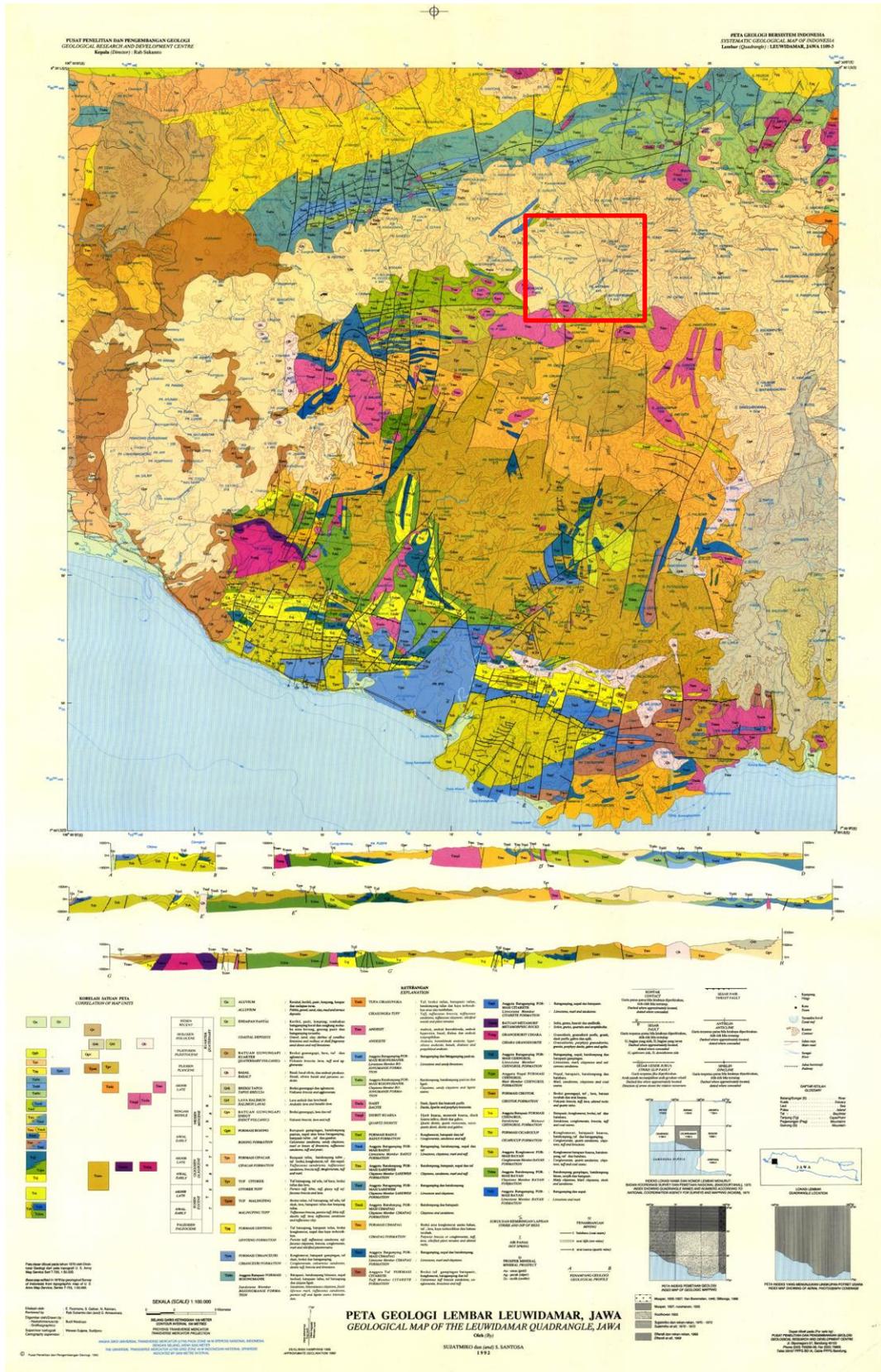
Pada peta geologi Lembar Leuwidamar (Gambar 2.1), tersaji lengkap satuan umur batuan mulai dari Eosen hingga Resen yang terbagi atas endapan permukaan, batuan sedimen, batuan gunungapi, batuan terobosan, dan batuan metamorf. Tebal satuan batuan endapan diperkirakan dari beberapa meter hingga mencapai seribu lima ratus meter.

Morfologi lembar leuwidamar dapat dibedakan dalam tiga satuan, yaitu pegunungan, perbukitan, dan dataran rendah. Pola sungai dalam lembar ini memiliki sifat tetap, sementara, dan berkala.

Morfologi pegunungan terdapat pada bagian tengah dan timur lembar, dicirikan oleh beberapa gunung api strato. Pola aliran sungainya memancar dan dendrit serta berlembah sempit dengan tebing curam.

Morfologi perbukitan terdapat di bagian utara, bagian barat, dan bagian selatan lembar. Dicirikan oleh perbukitan sedimen bergelombang, jalur-jalur pegunungan yang hampir sejajar dan kubah. Pola aliran sungai umumnya sejajar, kisi-kisi, dan dendritik, memiliki lembah agak lebar dengan tebing yang tidak terlalu curam. Pada beberapa sungai terdapat riam. Sungai utama sebagian besar memiliki bentuk berkelok-kelok.

Morfologi dataran rendah terlihat di sepanjang pantai selatan, di sekitar muara dan lembah sungai. Memiliki pola aliran sungai yang umumnya paralel dan *meandering*. Dicirikan dengan ketinggian yang hampir sama dengan undak pantai atau sungai.



Gambar 2.1. Peta geologi lembar Leuwidamar (Sujatmiko, 1992). Warna merah merupakan daerah penelitian.

Kelurusan berarah hampir utara - selatan (N 350- 10° E) yang memotong struktur yang terbentuk sebelumnya.

Batuan ubahan/ alterasi ditemukan di sekitar manifestasi Cikawah terdiri dari *silicified brecciated andesite*, lempung argilik (*argillic clay*) yang kaya mineral silika opal (*opaline silica*), dan setempat ditemukan klorit dominan. Batuan ubahan tersebut berwarna abu - abu keputihan, merah dan kekuningan. Warna - warna tersebut umumnya dipengaruhi oleh proses oksidasi, hematisasi dan sulfida yang terkandung di dalam batuan ubahan tersebut. Di daerah Handeuleum umumnya berupa lempung argilik (*argillic clay*), sementara di daerah Citoko dan Cibarani diduga sebagai fosil hidrotermal berupa ubahan argilik.

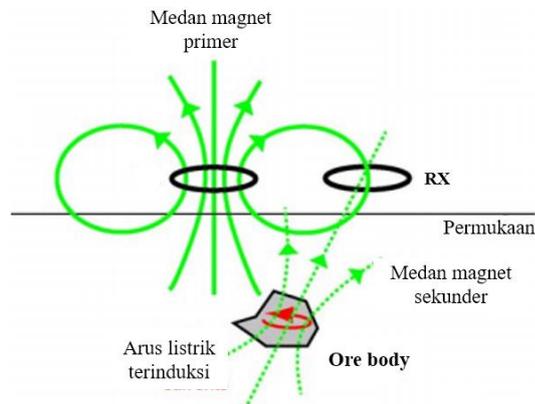
2.3. Teori Dasar

2.3.1. Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode elektromagnetik pasif yang memanfaatkan variasi medan listrik dan medan magnet alami bumi. Metode ini memiliki rentang frekuensi antara 10^{-4} Hz sampai dengan 10^4 Hz. Rentang frekuensi yang lebar tersebut, memberikan kita kemampuan untuk mempelajari struktur konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman yang dangkal hingga yang lebih dalam. Hal ini juga mengartikan bahwa metode ini dapat digunakan untuk penyelidikan lapisan *overburden* yang konduktif dan memiliki penetrasi kedalaman yang dalam. Metode MT mengukur medan magnet dan medan listrik secara bersamaan dalam dua arah yang tegak lurus. Hal ini dapat memberikan informasi penting terkait *electrical anisotropy* di wilayah tertentu (Daud, 2010). Metode magnetotellurik banyak digunakan untuk menentukan distribusi tahanan jenis, mendeteksi anomali konduktif, dan penargetan lokasi sumur potensial panas bumi (Erdogan, 2017).

Penggunaan medan elektromagnetik (EM) pada metode MT dapat dijabarkan sebagai berikut. Medan elektromagnetik (EM) primer akan menginduksi batuan atau material disekitarnya dan menyebabkan medan elektromagnetik sekunder

(*arus eddy*). Total medan EM yang akan terukur oleh *receiver* pada alat MT adalah jumlah dari medan primer dan sekunder (Unsworth, 2006).



Gambar 2.1. Fenomena penjalaran gelombang elektromagnetik (Unsworth, 2006).

Medan elektromagnetik didapat dari dua sumber, yaitu *lightning activity* atau fenomena terjadinya petir dengan frekuensi >1 Hz dan *solar wind* atau yang sering disebut angin matahari yang memiliki frekuensi <1 Hz (Unsworth, 2006). Kedua fenomena tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Gambar sebelah kiri merupakan fenomena angin matahari (Permana, 2019), gambar sebelah kanan merupakan fenomena petir (Rachmatunnisa, 2019).

2.3.2. Teori Dasar Elektromagnetik Dalam Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan teori paling dasar yang digunakan untuk memahami fenomena listrik – magnet yang sebelumnya telah dikemukakan oleh Faraday, Ampere, Coulomb, dan kontinuitas fluks magnetik yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Faraday}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Ampere}) \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (\text{Hukum Coulomb}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Hukum Kontinuitas Fluks Magnetik}) \quad (2.4)$$

Dimana \vec{J} merupakan vektor rapat arus yang memiliki satuan A/m². \vec{E} merupakan vektor medan listrik yang memiliki satuan V/m. \vec{B} merupakan vektor fluks magnet atau induksi magnetik yang memiliki satuan weber/m² atau tesla. \vec{H} merupakan vektor medan magnet yang memiliki satuan ampere/m. Dan \vec{D} merupakan vektor perpindahan listrik yang memiliki satuan coulomb/m². Sedangkan q merupakan rapat muatan listrik yang memiliki satuan coulomb/m³.

Persamaan **2.1** menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menghasilkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang membentuknya. Persamaan tersebut dapat diturunkan melalui hukum Faraday.

Persamaan **2.2** menyatakan bahwa medan magnet dapat ditimbulkan dari fluks jumlah arus listrik yang disebabkan oleh adanya konduksi dan arus perpindahan. Persamaan ini diturunkan melalui generalisasi hukum Ampere dengan hukum kekekalan muatan.

Persamaan **2.3** menyatakan bahwa fluks listrik pada ruang sebanding dengan total muatan yang ada dalam ruangan tersebut. Hukum ini diturunkan dari hukum Coulomb. Persamaan ini juga identik dengan persamaan **2.4** yang berlaku untuk medan magnet, namun tidak terdapat *monopole* magnetik (Telford, 1990).

2.3.3. Skin Depth

Metode magnetotellurik (MT) bergantung pada medan elektromagnetik yang masuk ke dalam bumi. Gelombang elektromagnetik dan konduktivitas batuan bumi itu sendiri akan berpengaruh terhadap penetrasi. Metode MT memiliki penetrasi yang dalam yaitu dapat melebihi kedalaman 3 km. Semakin rendah frekuensi yang digunakan, maka akan semakin dalam penetrasi kedalaman yang akan diperoleh.

Akan tetapi proses perekaman data menjadi semakin lama (Simpson. F dan Bahr, 2005).

Skin depth digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik. Dalam metode MT besaran *skin depth* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.5)$$

Dengan δ merupakan kedalaman penetrasi yang memiliki satuan meter (m). ρ merupakan resistivitas medium yang memiliki satuan ohm/m. Dan f merupakan nilai frekuensi dari gelombang elektromagnetik yang dipakai. Dapat disimpulkan dari persamaan 2.5 bahwa nilai besaran *skin depth* dipengaruhi oleh adanya frekuensi alat yang dipakai dan resistivitas batuan. Dengan frekuensi alat yang sama, penetrasi yang akan didapat juga akan semakin dalam jika nilai resistivitasnya semakin besar, berlaku sebaliknya.

Lapisan yang memiliki nilai resistivitas yang rendah, cenderung akan mengalirkan arus lebih mudah dari pada lapisan yang memiliki resistivitas tinggi, maka dari itu nilai resistivitas juga akan mempengaruhi penetrasi kedalaman. Ketika lapisan konduktif tersebut mendapat injeksi arus dari luar, maka arus luar akan lebih cenderung mengalir hanya di lapisan konduktif saja, tidak mengalir ke lapisan di bawahnya yang lebih resistif. Oleh karena itu, faktor resistivitas formasi batuan akan sangat mempengaruhi besar kedalaman penetrasi yang diperoleh. Parameter yang diukur dalam survei MT adalah medan listrik dan medan magnet di wilayah tersebut (Daud, 2010).

2.3.4. Akuisisi Data MT

Dalam akuisisi data MT, terdapat dua mode pengukuran yang dapat membantu dalam proses pemodelan dan interpretasi data awal, yaitu TE (*Transverse Electric mode*) dan TM (*Transverse Magnetic mode*).

1. *Transverse Electric Mode*

Pada polarisasi TE medan listrik E_x dan medan magnet H_y masing-masing sejajar dan tegak lurus dengan arah struktur (Grandis, 2013). Persamaan yang berlaku adalah:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu_0\sigma E_x \quad (2.6)$$

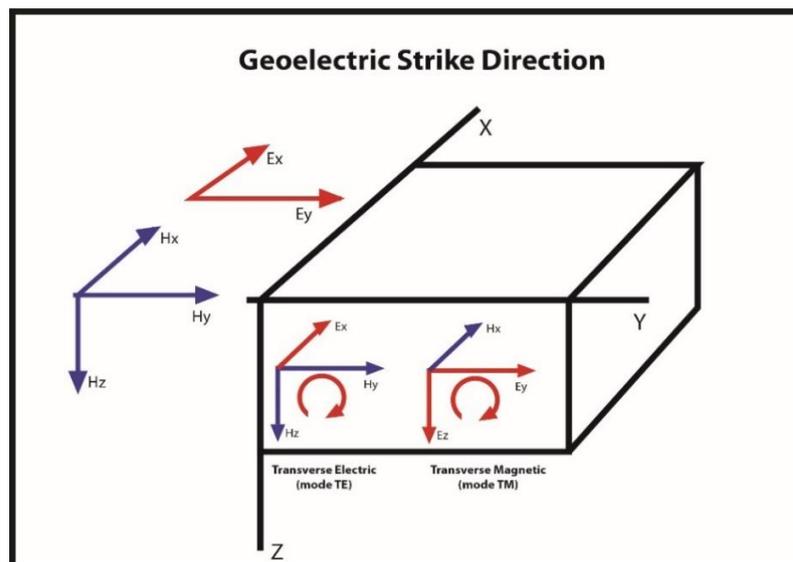
$$H_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} + \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.7)$$

2. Transverse Magnetic Mode

Pada polarisasi TM medan magnet H_x dan medan listrik E_y masing-masing sejajar dan tegak lurus dengan arah struktur (Grandis, 2013). Persamaan yang berlaku adalah:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \frac{\partial H_x}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} \right] = i\omega\mu_0\sigma H_x \quad (2.8)$$

$$E_y = \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (2.9)$$



Gambar 2.5. Konfigurasi Medan EM dalam *geoelectrical strike* 2-Dimensi. Pada mode TE, medan listrik E_x searah dengan struktur, sedangkan pada mode TM medan magnet H_x searah dengan struktur. (Vozoff, 2011).

2.3.5. Pengolahan Data MT

1. Transformasi *Fourier*

Secara prinsip, transformasi fourier adalah suatu operasi matematis yang mengubah sinyal menjadi spektrum. Dalam MT, transformasi fourier biasanya

digunakan untuk mengubah sinyal *time series* menjadi domain frekuensi (Simpson, F dan Bahr, 2005).

2. *Robust Processing*

Robust processing adalah teknik pemrosesan *statistical* yang menggunakan bobot *iterative* dari residual untuk mengidentifikasi dan menghapus data yang menyimpang oleh noise non-Gaussian. *Robust processing* menggunakan beberapa pengukuran dari *departure* suatu kontribusi individual dari rata-rata untuk bobot *outlier* pada iterasi selanjutnya. *Outlier* adalah data dengan nilai yang menyimpang jauh dari rata-rata, umumnya data tersebut dapat dianggap sebagai noise sehingga *robust processing* dapat berperan sebagai filter noise awal bagi data MT.

Robust processing berbeda dengan *least-square* karena dalam proses *least-square*, nilai dari *outlier* tetap diperhitungkan sehingga *outlier* tersebut dapat mempengaruhi semua data (Rulia, 2012).

3. Seleksi *Cross Power*

Proses seleksi *cross power* bertujuan untuk memilih dan memilah data yang paling sesuai dan menghasilkan trend kurva resistivitas dan fase yang *smooth* dan baik.

2.3.6. Analisis Data

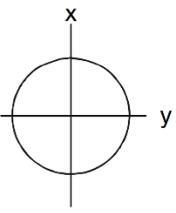
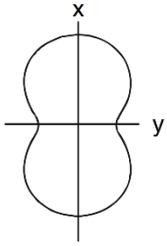
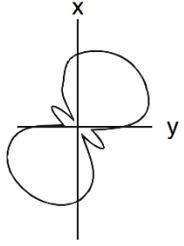
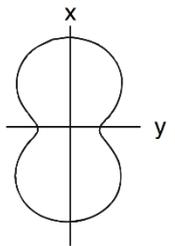
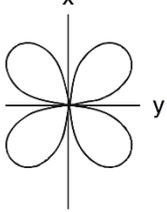
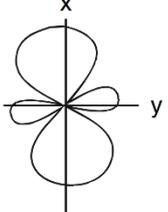
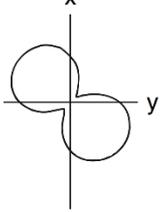
Analisis data yang dimaksud pada tahap ini berupa rotasi tensor impedansi. Rotasi tensor dilakukan untuk memenuhi asumsi *infinite elongated structure* pada pemodelan 2D. Dengan alasan tersebut analisis rotasi tensor impedansi harus dilakukan (Caldwell, 2004). Proses rotasi tensor dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu *skew Swift*, *skew Bahr*, dan diagram polar (Wibowo, 2019).

Untuk penelitian ini, analisis data dilakukan menggunakan diagram polar untuk mengetahui arah dominan *geoelectrical strike*-nya. *Geoelectrical strike* merupakan arah yang merepresentasikan aliran arus listrik di bawah permukaan yang disebabkan oleh adanya inhomogenitas lateral dari konduktivitas listrik di bumi (Akbar, 2020). Diagram polar dapat menentukan dimensional data MT. Untuk

material resistif, sumbu utama diagram polar tegak lurus dengan arah struktur. Sedangkan pada medium konduktif, sumbu utama diagram kutub sejajar dengan struktur (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008).

Analisis menggunakan diagram polar, umumnya menjabarkan hasil melalui bentuk analogi dari dimensional data tersebut. Analogi bentuk tersebut dapat digambarkan melalui lingkaran yang mewakili struktur 1D, *oval* yang mewakili struktur 2D, dan bentuk seperti kulit kacang yang mewakili struktur 3D (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008). Analogi dari ketiga bentuk tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Analogi bentuk dimensional tensor fasa (Berdichevsky dan Dmitriev, 2008). Struktur 1D digambarkan dengan bentuk lingkaran, struktur 2D digambarkan dengan bentuk oval, dan struktur 3D digambarkan dengan bentuk kulit kacang.

	1 D	2 D	3 D	
			a	b
φ_{xx}				
φ_{xy}				

2.3.7. Pemodelan Data MT

1. Inversi 1D

Inversi 1 dimensi berupa model berlapis horizontal, yaitu model yang terdiri dari beberapa lapisan, dimana tahanan jenis tiap lapisan homogen. Dalam hal ini parameter inversi 1 dimensi adalah tahanan jenis dan ketebalan tiap lapisan (Yulianti, 2017).

2. Inversi 2D

Inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis bawah permukaan. Analisis terhadap data lapangan dilakukan dengan cara melakukan pencocokan kurva antara model matematika dengan data lapangan.

Inversi 2 dimensi dapat dilakukan dengan menggunakan metode inversi *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG). Metode NLGC populer digunakan untuk masalah inversi magnetotelurik (MT) dua dimensi dan tiga dimensi (Lu, 2019). Metode inversi NLGC lebih efisien dalam waktu komputasi dan *memory* (Zuo, 2018). Metode *conjugate gradient* adalah metode yang efisien untuk pengoptimalan perhitungan berskala besar (Fischbacher, 2017). Proses algoritma NLCG yaitu menyederhanakan suatu fungsi kompleks sehingga pembuatan model menggunakan model *smoothing* pada data MT observasi (Rodi, 2001). Metode NLCG mampu memperkecil suatu fungsi objek yang terdapat pada resistivitas. Metode NLCG dapat secara langsung meminimalisasi problem yang bukan kuadratik, membebaskan kerangka iterasi dan inversi linear. Penyelesaian yang dapat dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan inversi MT adalah dengan meminimalkan persamaan fungsi *unconstraint* yang ada dengan pendekatan iterasi (Yulianti, 2017). Secara matematis penyelesaian tersebut dapat dihitung dengan persamaan **2.10**.

$$\psi(\mathbf{m}) = (\mathbf{d} - F(\mathbf{m}))^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{d} - F(\mathbf{m})) + \lambda \mathbf{m}^T \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{m} \quad (2.10)$$

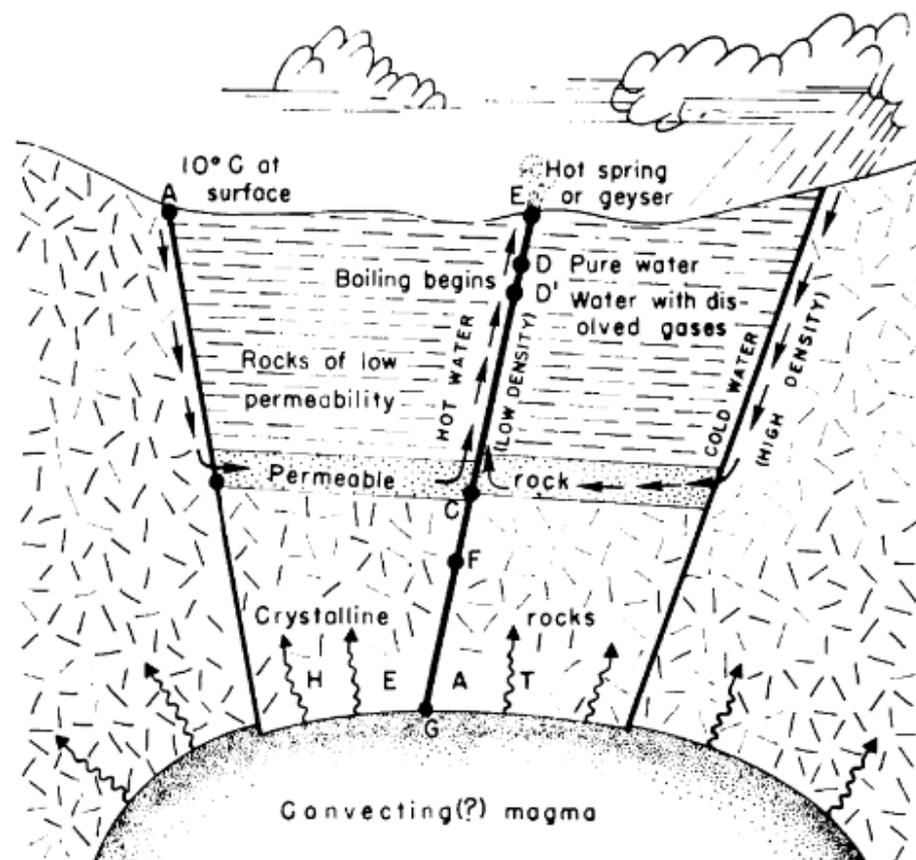
Dengan \mathbf{m} merupakan vektor model, \mathbf{d} merupakan vektor data, F merupakan fungsi *forward modeling*, \mathbf{V} merupakan vektor error, \mathbf{L} merupakan grid model, dan \mathbf{Lm} merupakan Laplacian dari $\log \rho$ (Rodi, 2001).

2.3.8. Sistem Panas Bumi

Panas bumi secara umum dapat diartikan sebagai jumlah kandungan panas yang tersimpan dalam bumi dan membentuk sistem panas bumi yang telah ada sejak bumi terbentuk. Sistem panas bumi tersebut mencakup sistem hidrotermal yang

merupakan sistem tata air, proses pemanasan dan kondisi sistem dimana air yang terpanas terkumpul sehingga sistem panas bumi mempunyai persyaratan seperti harus tersedianya air, batuan pemanas, batuan sarang, dan batuan penutup (Basid, 2014).

Syarat utama suatu tempat dapat disebut dengan sistem panas bumi (hidrotermal) adalah terdapat sumber panas yang besar (*heat source*), reservoir untuk mengakumulasi panas, dan lapisan penudung yang menjadi tempat terakumulasinya panas (*cap rock*). Dalam sistem hidrotermal, panas dapat berpindah secara konduksi dan konveksi (Basid, 2014).



Gambar 2.6. Generalisasi model konseptual panas bumi dalam suhu tinggi (White, 1997)

Sistem panas bumi pada daerah penelitian ini termasuk klasifikasi sistem panas bumi bertipe vulkanik. Sistem panas bumi vulkanik adalah sistem panas bumi yang berasosiasi dengan gunungapi Kuartar yang umumnya terletak pada busur vulkanik Kuartar yang memanjang dari Sumatera sampai Nusa Tenggara dan Sebagian kecil

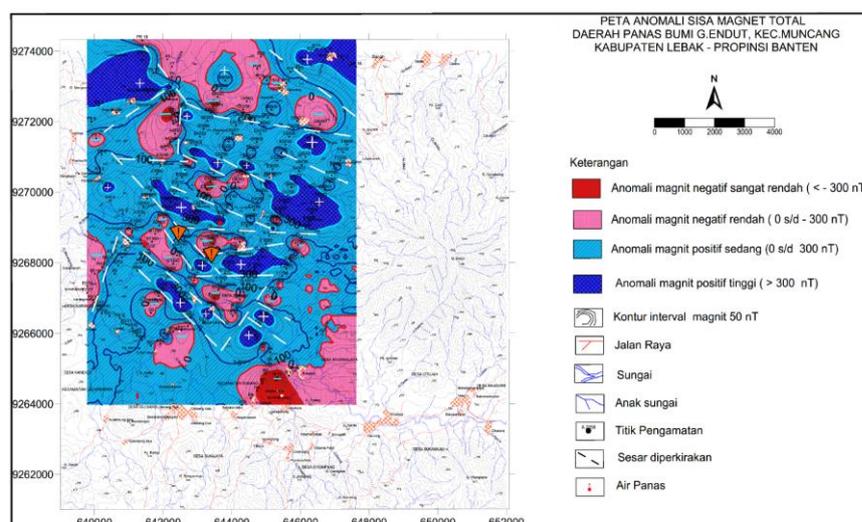
Maluku dan Sulawesi. Pembentukan sistem panas bumi ini umumnya tersusun atas batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam dan umumnya memiliki karakteristik reservoir sekitar 1,5 km dengan reservoir tinggi mulai dari 250 sampai dengan 370⁰C (Kasbani, 2009).

2.4. Penelitian Yang Sudah Pernah Dilakukan

2.4.1. Pemetaan Metode Magnetik

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (Kusnadi, 2006) didapatkan juga peta anomali sisa magnet total (Gambar 2.7) dengan hasil sebagai berikut:

1. Didominasi dengan anomali positif yang mengisyaratkan bahwa batuan bawah permukaan sebagian besar tersusun oleh batuan vulkanik (andesit) dan intrusi andesit.
2. Terdapat juga anomali negatif (-300-0 nT) yang diduga merupakan batuan yang bersifat non-magnetik seperti batuan sedimen (gamping, serpih, batu pasir, piroklastik, batuan lapuk) dan batuan terubahkan yang diakibatkan oleh proses demagnetisasi akibat fluida hydrothermal.
3. Anomali magnet sedang (0-300 nT) ditafsirkan sebagai batuan vulkanik andesit dan intrusi andesit yang merupakan batuan transisi dari asam ke basa yang disusun oleh mineral gelap. Anomali magnet tinggi (>300 nT) berkaitan dengan batuan andesit tersier yang telah mengalami mineralisasi.

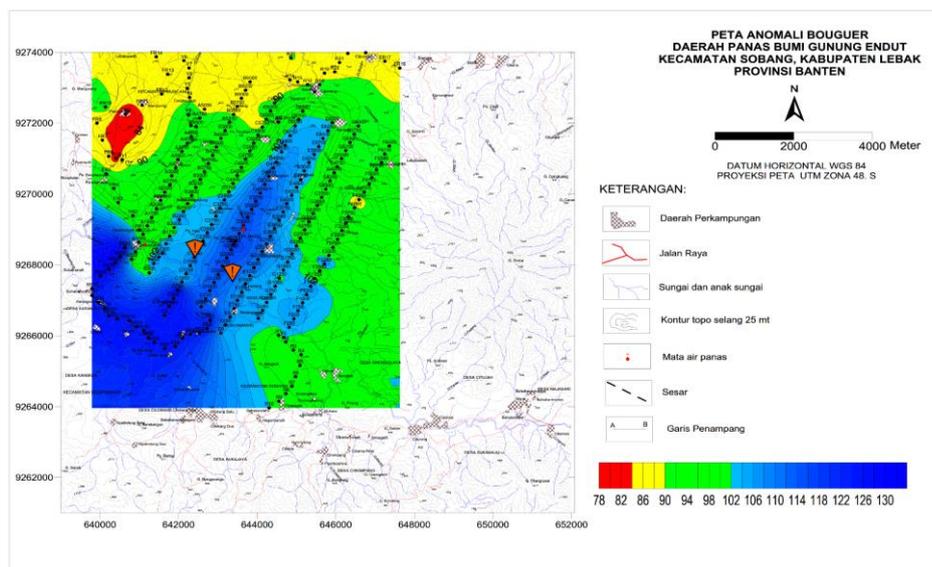


Gambar 2.7. Peta anomali sisa magnetik total yang didapat dari penelitian sebelumnya (Kusnadi, 2006).

2.4.2. Pemetaan Metode Gaya Berat

Berdasarkan hasil penelitian metode gaya berat yang dilakukan oleh Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (Kusnadi, 2006) didapatkan peta anomali gaya berat (Gambar 2.8) dengan hasil sebagai berikut:

1. Anomali tinggi berada dari arah barat daya dan mengarah ke timur laut bagian tengah. Bagian barat, timur laut, timur, dan tenggara memiliki sebaran anomali sedang. Untuk anomali rendah berada di bagian utara sampai ke arah barat laut. Hal ini menyatakan adanya hubungan suatu rentang densitas tertentu atau terdapat zona lemah di area penelitian. Jika dihubungkan dengan peta geologi, terdapat zona lemah semacam sesar Cikawah dan sesar Handeuleum di tengah daerah penyelidikan.
2. Anomali rendah memperlihatkan bahwa daerah tersebut tersusun dari batuan sedimen (formasi Baduy) yang diduduki oleh batuan lempung hitam dan batuan gamping.
3. Anomali (90-100 mgal) muncul di bagian barat laut, utara, timur dan tenggara merefleksikan lava yang lebih muda dari produk Gunung Endut berupa lava andesit, lava breksi, dan endapan piroklastik (tuf).

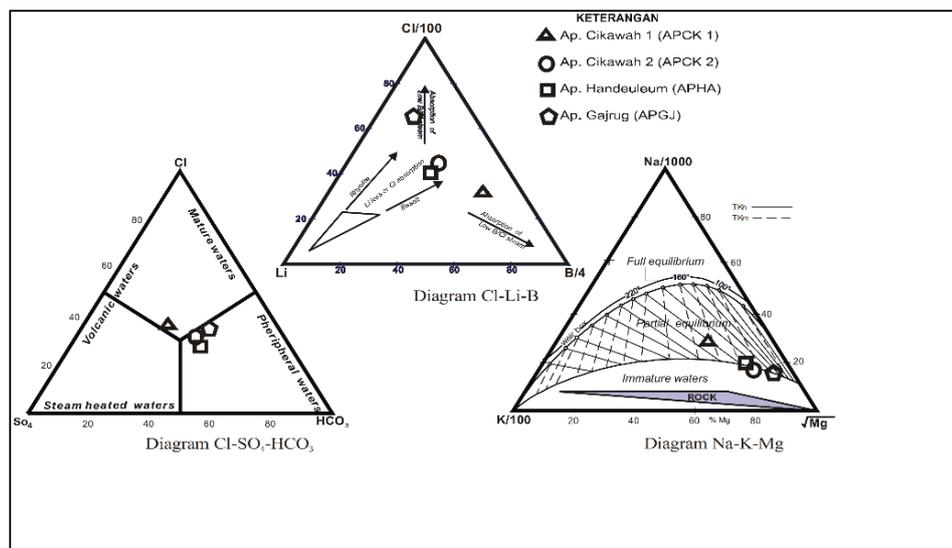


Gambar 2.8. Peta anomali Bouguer pada daerah penelitian yang didapat dari penelitian sebelumnya (Kusnadi, 2006).

2.4.3. Penelitian Geokimia

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh tim dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (Kusnadi, 2006) terdapat beberapa poin, yaitu:

1. Didapatkan dari klasifikasi pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, pada Gambar 2.9 manifestasi air panas Cikawah 1 mengandung klorida, hal ini disebabkan oleh kandungan Cl yang tinggi pada air panas temperatur tinggi yang kemungkinan berhubungan dengan *deep water*. Sedangkan manifestasi air panas Cikawah 2 dan Handeuleum bertipe karbonat, dengan konsentrasi sulfat dan klorida tidak jauh berbeda dengan konsentrasi bikarbonatnya.
2. Didapatkan dari diagram segitiga Na-K-Mg pada Gambar 2.9 mata air panas berada pada *partial equilibrium*, yang merupakan indikasi terjadinya interaksi batuan dengan fluida panas sebelum ke permukaan.
3. Didapatkan dari diagram segitiga Cl-Li-B pada Gambar 2.9 posisi semua mata air panas terletak ditengah-tengah diagram, indikasi adanya keseimbangan interaksi batuan dengan fluida panas ketika menuju ke arah permukaan.
4. Didapatkan dari persamaan geotermometer SiO₂ dan NaK didapatkan nilai temperatur 162°C dan 181°C, maka diperkirakan temperatur bawah permukaan di daerah penyelidikan adalah sekitar 180°C yang termasuk ke dalam tipe temperatur sedang.



Gambar 2.9. Diagram segitiga kandungan Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg, dan Cl-Li-B yang menunjukkan kandungan kimia pada manifesta daerah penelitian (Kusnadi, 2006)