

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki banyak gunung api^[1]. Adanya jalur gunung api aktif menjadikan wilayah Sumatera Barat memiliki banyak potensi panas bumi. Menurut data Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Sumatera Barat (2017) [2] Sumatera Barat memiliki potensi panas bumi sebesar 1.656 MWe dengan total cadangan 858 MWe. Potensi panas bumi Sumatera Barat tersebar di Kabupaten Pasaman, Pasaman Barat, Lima Puluh Kota, Tanah Datar, Agam, Solok, dan Solok Selatan^[2]. Kondisi ini terkait dengan posisi Sumatera Barat yang terletak pada pertemuan dua lempeng dunia, yaitu lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia serta terdapat patahan (sesar) Semangko^[1]. Proses tumbukan lempeng menghasilkan jalur magmatik di sepanjang pulau-pulau dan lautan yang dilaluinya, sehingga muncullah gunung api. Bukti tumbukan Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia tampak dari deretan gunung berapi aktif, termasuk Gunung Talang di Solok^[3].

Solok merupakan salah satu daerah di Sumatera Barat yang memiliki potensi panas bumi sebesar 24 MWe hipotesis dan 66 MWe cadangan terduga^[4]. Daerah Solok berada pada segmen Suliti yang melintang sepanjang 95 km dari Gunung Talang sampai Gunung Kerinci. Pola struktur geologi tersebut mengontrol sistem panas bumi Solok, yang berhubungan dengan pembentukan zona sesar. Zona sesar merupakan zona lemah yang mengganggu akuifer tanah sehingga memunculkan manifestasi di daerah panas bumi^[3]. Zona sesar ini menyebabkan muncul manifestasi panas bumi di sekitar Gunung Talang seperti mata air panas, fumarol, dan sinter karbonat^[1].

Salah satu daerah di Gunung Talang yang memiliki prospek panas bumi adalah Nagari Sungai Janiah, Kecamatan Gunung Talang. Potensi tersebut dibuktikan dengan adanya manifestasi permukaan berupa mata air panas Bukit Gadang dengan suhu permukaan 43,1°C dan pH 8,2^[5]. Daerah Gunung Talang yang

berada di jalur tersebut memiliki potensi panas bumi didukung dengan adanya kemunculan mata air panas, *steaming ground*, *hidrothermal eruption*, dan batuan alterasi. Hasil dari penyelidikan terdahulu juga menunjukkan potensi keberadaan sistem panas bumi di daerah tersebut^[1]. Kemunculan beberapa manifestasi permukaan di sekitar Gunung Talang diduga sangat berkaitan dengan aktivitas magma andesit dan daerah subduksi pada pinggiran benua aktif antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia^[6]. Panas bumi di daerah penelitian bertipe fluida sulfat, kandungan sulfat antara 80,00 mg/L sampai 193,75 mg/L, artinya sumber mata air panas yang terbentuk akibat sistem vulkanik aktif mempunyai karakteristik berkedalaman sedang^[7].

Penelitian lain terkait potensi panas bumi di Gunung Talang dilakukan oleh Kholid dkk [8]. Pada penelitian menggunakan metode magnetotellurik mereka menemukan tahanan jenis rendah di daerah graben mulai manifestasi Bukit Kili di bagian selatan hingga daerah Gunung Talang di sebelah Utara. Tahanan jenis rendah yang diinterpretasikan sebagai batuan penudung ini tersebar dari mulai permukaan hingga kedalaman sekitar 1800 meter dengan ketebalan antara 1000 meter hingga 2500 meter. Reservoir panas bumi diperkirakan berada di bawah batuan penudung yang terdapat di bagian selatan yaitu di daerah Gunung Talang. Puncak dari reservoir ini berada pada kedalaman sekitar 1800 meter dan semakin mendalam ke arah utara yang dapat mencapai kedalaman sekitar 2500 meter^[8]. Penelitian terkait karakteristik fluida dan estimasi temperatur reservoir oleh Utami dan Putra [5] di sekitar Gunung Talang menunjukkan fluida berada pada *immature water* yang menandakan fluida reservoir panas bumi telah mengalami pengenceran dengan unsur lain. Fluida reservoir berasal dari sistem hidrotermal baru yang dipengaruhi oleh magma Gunung Talang. Pendidihan fluida reservoir panas bumi berada di bawah permukaan bumi hingga kedalaman sekitar 150 meter. Estimasi temperatur reservoir panas bumi dengan geotermometer silika adalah 147,63°C-179,77°C, yang termasuk dalam sistem panas bumi bertemperatur sedang^[5].

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, belum didapatkan penjelasan secara jelas bagaimana manifestasi permukaan di sekitar Gunung Talang dapat terbentuk dalam kaitannya dengan potensi panas bumi di daerah tersebut. Oleh

karena itu, dalam penelitian ini dilakukan survei geofisika pada daerah manifestasi permukaan air panas Bukit Gadang untuk memprediksi bagaimana air panas tersebut dapat terbentuk dan muncul ke permukaan. Kemunculan manifestasi berupa air panas sangat erat kaitannya dengan adanya jalur-jalur sesar atau patahan yang melewatinya. Sesar-sesar ini pada akhirnya akan berhubungan langsung dengan asal mula fluida panas bumi (reservoir) sebagai sumber energi panas utama suatu sistem panas bumi^[9].

Pencarian sumber energi panas bumi diperlukan suatu metode survei, salah satunya menggunakan metode geofisika yaitu metode magnetik. Metode ini dapat dilakukan dengan pengukuran medan magnet pada permukaan daerah energi panas bumi. Keberadaan panas bumi pada umumnya bergantung pada sesar-sesar di sekitar sumber panas bumi. Uap dan air panas biasanya keluar ke permukaan melalui rekahan atau patahan. Sistem panas bumi Gunung Talang dapat diduga terkait dengan sesar di daerah sumber panas bumi. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian keberadaan dan model sesar pada daerah sistem panas bumi ini. Metode geomagnetik merupakan salah satu metode geofisika yang sederhana dalam proses pengambilan data dibandingkan metode lainnya^[10]. Metode ini mengukur medan magnet total bumi di suatu tempat menggunakan magnetometer dengan akurasi pengukuran yang tinggi dan dapat mendeteksi bawah permukaan yang dalam^[11]. Metode ini telah digunakan untuk mengidentifikasi reservoir panas bumi di Kasinan-Songgoriti, Jawa Timur [12], di kraton Dharwar, India [13], di Semurup, Kerinci [14], dan lokasi lainnya. Dengan demikian, metode geomagnet cocok untuk mendeteksi potensi energi panas bumi sebagai survei pendahuluan. Di dalam penelitian ini juga dilakukan pemodelan 3D untuk mengetahui faktor penyebab kemunculan manifestasi permukaan air panas Bukit Gadang. Pemodelan 3D memberikan hasil yang lebih detail terkait sesar-sesar yang ada di daerah penelitian dan perbedaan anomali magnetik dari batuan-batuan bawah permukaan.

I.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi struktur sesar sebagai tempat mengalirnya fluida panas bumi sehingga membentuk manifestasi permukaan air panas Bukit Gadang.

Manfaat penelitian ini yaitu menambah informasi terkait sistem panas bumi Gunung Talang khususnya sesar di air panas Bukit Gadang, dan meningkatkan akurasi prediksi kemunculan suatu air panas.

I.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data dilakukan pada 12 lintasan di kawasan manifestasi panas bumi di Bukit Gadang.
2. Data magnetik total diambil langsung pada 144 titik di sekitar mata air panas.
3. Data pendukung berupa nilai IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), deklinasi, dan inklinasi diperoleh dari dari *website* NOAA.



BAB II LANDASAN TEORI

II.1 Sistem Panas Bumi

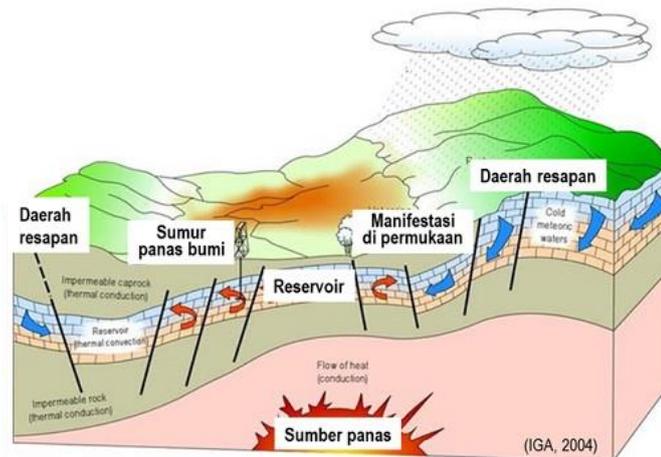
Panas bumi adalah tenaga panas yg terbentuk secara alami dan tersimpan dalam bentuk fluida panas dengan syarat geologi pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Hochstein dan Browne mendefinisikan sistem panas bumi sebagai perpindahan panas yang terjadi secara alami dalam volume tertentu di kerak bumi dimana panas dipindahkan dari asal panas ke zona pelepasan panas. Sebagian besar sumber panas bumi bersuhu tinggi berasal dari intrusi magma cair yang terdapat pada level dangkal di kerak bumi. Faktor utama yang menggerakkan fluida ialah adanya disparitas densitas antara air resapan yang suhunya lebih rendah dan beranjak ke bawah menggunakan fluida panas bumi yg suhunya lebih tinggi lalu timbul ke permukaan bumi oleh gaya pengapungan^[15].

Panas bumi merupakan sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi dan untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan^[16]. Panas bumi dapat dibagi menjadi 4 jenis: reservoir hidrotermal (*hydrothermal reservoir*), reservoir bertekanan tinggi (*geopressured reservoir*), reservoir batuan panas kering (*hot dry rock reservoir*), dan reservoir magma (*magma reservoir*).

Panas bumi dapat dijadikan sebagai sumber energi dari pembangkit listrik dengan syarat daerah panas bumi tersebut bertemperatur tinggi (lebih dari 180°C), sebagian besar terdapat pada sistem magmatik vulkanik aktif. Sementara, pemanfaatan energi panas bumi untuk pemanfaatan langsung (*direct use*) bisa diperoleh menggunakan sistem magmatik vulkanik aktif dan sistem selain magmatik vulkanik aktif. Sistem magmatik vulkanik aktif yang memiliki temperatur tinggi umumnya terdapat di sekitar pertemuan antar lempeng samudra dan lempeng benua.

Sistem panas bumi biasanya terdapat pada wilayah dengan gradient panas bumi relatif normal, terutama dalam bagian tepi lempeng yang mempunyai kisaran suhu yang lebih tinggi dari pada suhu rata-rata^[17].

II.1.1 Elemen sistem panas bumi



Gambar II.1 Sistem panas bumi^[15]

Terdapat empat elemen yang sangat berperan dalam sistem panas bumi di sebagian besar Indonesia, yaitu:

a. Sumber Panas

Secara umum panas (*heat source*) dapat berpindah secara konduktif, konvektif dan radiasi. Pada sistem panas bumi perpindahan panas biasanya secara konduktif dan konvektif. Transfer panas konduktif terjadi pada batuan akibat adanya interaksi batuan penyusun dalam mantel, sedangkan transfer panas secara konvektif adalah perpindahan panas yang diikuti oleh perpindahan partikelnya. Sumber panas dalam sistem panas bumi sebagian besar berasal dari magma. Pembentukan magma diawali dengan proses pelelehan mantel (*partial melting*) pada sebagian kerak bumi yang mengalami proses penebalan lempeng benua seperti yang terjadi pada tumbukan antar lempeng benua (*collision*) sebagai akibat dari penurunan titik didih mantel karena adanya infiltrasi H₂O di zona subduksi.

b. Fluida Panas Bumi

Fluida panas bumi terbentuk dari air permukaan (*meteoric water*) yang meresap ke bawah tanah melalui rekahan atau batuan membentuk sistem

reservoir^[18]. Selain dari air permukaan, Fluida juga berasal dari batuan dalam bentuk air magmatik (*juvenil water*). Tipe dari sistem panas bumi dapat ditentukan dari karakteristik fluida panas bumi. Penentuan karakteristik fluida dalam reservoir meliputi pendugaan temperatur reservoir (*geothermometer*), kimia fluida, asal-usul fluida, interaksi fluida terhadap batuan serta pencampuran fluida reservoir dengan fluida lain ^[19].

c. Reservoir

Reservoir merupakan lapisan batuan yang memiliki permeabilitas dan porositas tinggi yang berfungsi untuk menyimpan fluida bersuhu tinggi hasil dari pemanasan dalam suatu sistem hidrothermal. Lapisan ini berasal dari batuan klastik atau batuan vulkanik yang telah mengalami rekahan secara kuat. Porositas dan permeabilitas yang tinggi, ukuran volume cukup besar, suhu tinggi dan kandungan fluida yang cukup menggambarkan reservoir panas bumi yang produktif. Permeabilitas dihasilkan oleh karakteristik stratigrafi dan unsur struktur (misalnya sesar, kekar dan rekahan).

d. Batuan Penudung

Lapisan penudung (*caprock*) berfungsi sebagai penutup reservoir untuk mencegah keluarnya fluida panas bumi dari reservoir. Lapisan batuan yang bersifat kedap atau memiliki permeabilitas rendah merupakan ciri dari batuan penudung. Pada umumnya, Lapisan penudung tersusun oleh lapisan batuan mineral lempung sekunder hasil alterasi akibat interaksi fluida panas bumi dengan batuan yang dilewatinya. Mineral-mineral lempung sekunder yang umum membentuk lapisan penudung adalah *illite*, *phyrophyllite*, *kaolin*, *smectite*, dan *montmorilonite*. Pada zona tektonik aktif batuan penudung mengalami deformasi dan membentuk rekahan, tetapi rekahan yang terbentuk dapat tertutup karena adanya proses kimia yaitu berupa pengendapan, contohnya pengendapan kalsit dan silika.

II.1.2 Manifestasi Permukaan

Manifestasi yang ada di permukaan dapat terjadi karena adanya intrusi panas dari bawah permukaan dan adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan aliran fluida panas bumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan. Daerah yang terdapat

manifestasi panas bumi biasanya merupakan daerah yang dicari untuk dilanjutkan ke tahap eksplorasi. Menurut Broto dan Putranto potensi panas bumi dapat dilihat dari manifestasi panas bumi yang muncul di permukaan yaitu^[16]:

1. Mata air panas

Mata air panas adalah mata air yang dihasilkan akibat keluarnya air tanah dari kerak bumi setelah dipanaskan oleh sistem panas bumi. Air yang keluar suhunya di atas 37°C atau bahkan ada yang suhunya hingga di atas titik didih. Air panas lebih dapat mengencerkan padatan mineral, sehingga banyak mengandung kalsium, litium, atau radium.

Mata air panas sering berkaitan dengan aktivitas magma yang ada di bawah permukaan bumi dan juga dipengaruhi oleh proses vulkanisme. Mata air panas dapat memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

- a. Memiliki pH 6-7
- b. Biasanya memiliki temperatur > 75°C
- c. Terdapat sinter silika dan mineral fluida seperti gelana, pirit, dan lain-lain

Dapat terbentuk dalam beberapa tingkatan mulai dari rembesan hingga menghasilkan air dan uap panas yang dapat dimanfaatkan secara langsung (pemanas ruangan/rumah pertanian atau air mandi) atau dari segi lain dapat dimanfaatkan sebagai penggerak turbin listrik dan yang paling penting adalah dengan mengukur suhunya dapat diperkirakan berapa besaran keluaran energi panas dari reservoir di bawah permukaan.

2. Sinter Silika

Silika (SiO_2) yang dibawah oleh fluida panas netral mungkin mengendap di sekitar mata air. Sinter memiliki berbagai struktur seperti *dribbling*, berpori, *layering*, dll. Sering juga membentuk sebuah teras besar. Sinter silika berasal dari fluida hidrotermal mengandung silika yang diendapkan ketika fluida jenuh, silika amorf mengalami pendinginan dari 100°C ke 50°C. Endapan ini dapat digunakan sebagai indikator yang identik bagi keberadaan reservoir bersuhu > 175°C.

3. Tanah hangat dan uap air

Tanah hangat menunjukkan sebuah level terendah dalam aktifitas panas bumi. Tanah dapat menjadi lebih hangat karena suhunya meningkat pada kedalaman 1 meter. *Warm ground* tidak dapat terlihat oleh pencitraan inframerah tetapi perubahan vegetasi dapat diidentifikasi.

Tanah hangat dan uap air yang naik ke permukaan akan menaikkan suhu disekitar daerah termal area sehingga suhu di daerah ini akan lebih tinggi daripada daerah di sekitarnya dan juga lebih tinggi dari suhu udara di dekat permukaan bumi yang kadang kadang mencapai 30°C- 40°C. Sering kali indikasi langsung teramati, dan efek sekitar daun berwarna kuning, merah, dan coklat.

4. *Hot Steaming Ground*

Manifestasi panas bumi ini dapat terbentuk karena uap panas dari suatu lapisan yang berada dekat di bawah permukaan, di lapisan tipis tersebut terdapat air panas yang mempunyai temperatur sama atau lebih besar dari titik didihnya. Temperatur permukaan di atas air panas ini tergantung dari laju aliran uap. Salah satu ciri-ciri permukaan tanah beruap ini dapat dilihat dari tidak adanya vegetasi di sekitarnya, bahkan sangat berbahaya bagi makhluk hidup karena pada umumnya memiliki temperatur yang tinggi.

5. Fumarol

Fumarol merupakan uap panas yang keluar melalui celah-celah dalam batuan dan kemudian berubah menjadi uap air, yang umumnya mengandung gas SO₂ yang relatif tinggi serta gas CO₂, HF, HCl, dan S. Fumarol yang mengasosiasikan dengan sistem vulkanik-hidrotermal dapat memancarkan uap dengan kecepatan >150 m/s. Jika kandungan SO₂ dominan, suhu bisa mencapai >1300°C. fumarol basah memiliki suhu <1000°C terbentuk sistem dominasi air, fumarol kering dengan suhu 110°C - 1500°C terbentuk sistem dominasi uap.

6. Solfatara

Solfatara berasal dari Fumarol yang mengeluarkan uap air yang keluar melalui rekahan batuan yang bercampur dengan H₂S, CO₂, dan kadang juga SO₂ serta dapat mengendapkan sulfur di sekitar rekahan tempat keluarnya. Solfatara biasanya akan mengeluarkan bau busuk dari kandungan belerang.

7. *Acid Hot Spring*

Mata air panas dengan pH asam ($\text{pH} < 6$) yang terbentuk dari hasil kondensasi gas-gas magmatik dan uap panas di dekat permukaan bumi kemudian melarut dan bercampur dengan air meteorik dan kemudian keluar menjadi mata air dengan pH asam.

8. *Neutral Hot Spring*

Mata air panas dengan pH netral atau mendekati netral ($\text{pH} 6 - 7$). Mata air ini diasosiasikan sebagai *direct discharge* fluida dari reservoir ke permukaan bumi. Umumnya mengandung ion klorida yang tinggi sehingga sering kali disebut air klorida. Di sekitar mata air panas ini sering dijumpai endapan silika sinter dan mineral-mineral sulfida seperti galena, pyrit dll.

9. *Mud Pool*

Kolam lumpur yang kenampakannya sedikit mengandung uap dan gas CO_2 , tidak terkondensasi, umumnya fluida berasal dari kondensasi uap. Penambahan cairan lumpur uap menyebabkan gas CO_2 keluar.

10. *Geyser*

Sejenis mata air panas yang menyembur secara periodik, mengeluarkan air panas dan uap air ke udara dengan tekanan yang sangat tinggi. Syarat terbentuk geyser adalah batuan dengan retakan dan air mendidih pada kedalaman dangkal. Di sekitar geyser terdapat geysirites, yaitu silika dengan tekstur *mamillary*.

II.2 Sesar

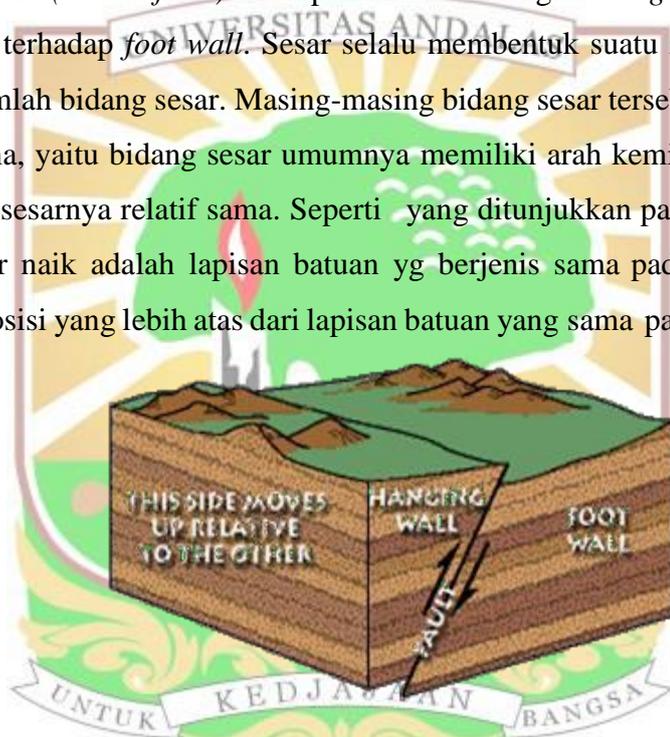
Patahan atau sesar (*fault*) adalah rekahan atau pergeseran atau pergerakan lapisan batuan di bawah permukaan bumi yg terjadi pada satu blok batuan bergerak relatif terhadap blok yg lainnya. Pergerakannya bisa relatif turun, relatif naik, ataupun bergerak relatif mendatar terhadap blok yang lainnya^[20]. Pergerakan atau pergeseran dapat berkisar beberapa milimeter hingga ratusan meter, sedangkan panjangnya dari beberapa meter hingga ribuan kilometer. Pergerakan dari suatu patahan atau sesar dapat mengakibatkan gempa bumi. Selain itu, pergerakan atau

pergeseran sesar juga dapat mengubah topografi, mengontrol air permukaan dan bawah permukaan, merusak stratigrafi batuan dan sebagainya.

Pada umumnya, terbentuknya sesar pada suatu daerah akibat tektonik dengan waktu dan tempat yang sama tidaklah tunggal, selalu terjadi lebih dari satu jalur sesar dengan ukuran yang bervariasi. Terdapat 3 kelompok sesar utama, yaitu sesar naik, sesar normal dan sesar mendatar^[21].

II.2.1 Sesar Naik

Sesar naik (*thrust fault*) merupakan sesar dengan *hanging wall* relatif bergerak naik terhadap *foot wall*. Sesar selalu membentuk suatu zona sesar yang dijumpai sejumlah bidang sesar. Masing-masing bidang sesar tersebut membangun pola yang sama, yaitu bidang sesar umumnya memiliki arah kemiringan yg sama dan arah jalur sesarnya relatif sama. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.2, ciri pada sesar naik adalah lapisan batuan yg berjenis sama pada *hanging wall* berada pada posisi yang lebih atas dari lapisan batuan yang sama pada *foot wall*.

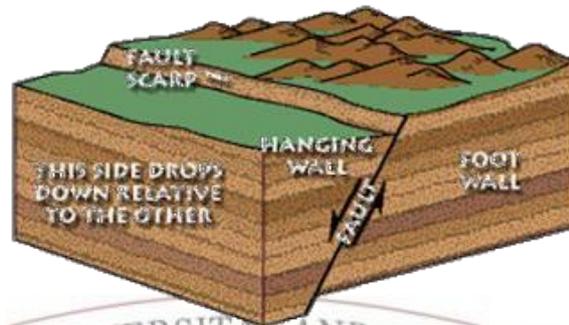


Gambar II.2 Sesar naik atau *thrust fault*^[22]

II.2.2 Sesar Normal

Sesar normal (*normal fault*) dikenali juga sebagai sesar gravitasi, dimana gaya gravitasi menjadi gaya utama yang menggerakannya. Sesar normal terbentuk akibat adanya tekanan ekstensional, sehingga gaya gravitasi lebih dominan. Kondisi ini mengakibatkan beberapa bagian tubuh batuan akan bergerak turun yang selanjutnya lazim dikenal sebagai proses pembentukan sesar normal. Sesar ini terjadi ketika *hanging wall* relatif bergerak ke bawah terhadap *foot wall*. Seperti

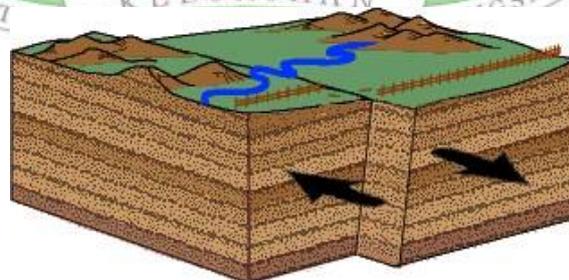
yang ditunjukkan pada Gambar II.3, ciri dari sesar normal adalah *hanging wall* relatif turun terhadap *foot wall*, sehingga lapisan batuan yang berjenis sama dengan *foot wall* akan cenderung lebih turun.



Gambar II.3 Sesar normal atau *normal fault*^[22]

II.2.3 Sesar Mendatar

Sesar mendatar (*strike-slip fault*) merupakan tipe sesar yang terbentuk karena adanya tegangan kompresi. Posisi tegangan utama pembentuk sesar ini adalah horizontal, sama dengan posisi tekanan minimumnya, sedangkan posisi tekanan menengah adalah vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.4. Bidang sesar mendatar umumnya digambarkan secara vertikal, sehingga istilah *hanging wall* dan *foot wall* tidak lazim digunakan di dalam sistem sesar ini. Seperti halnya sesar naik, sesar mendatar pun umumnya tidak berdiri tunggal melainkan terdiri dari beberapa bidang sesar yang selanjutnya membentuk zona sesar. Di dalam zona sesar mendatar, umumnya sesar ini membentuk segmen-segmen sesar yang merencong.



Gambar II.4 Sesar mendatar atau *strike-slip fault*^[22]

II.3 Teori Metode Geomagnet

Metode geomagnet merupakan bagian dari metode geofisika untuk mengukur variasi medan magnet di permukaan bumi yang disebabkan karena adanya variasi distribusi batuan termagnetisasi di bawah permukaan bumi. Intensitas medan magnetik yang ada pada lapisan batuan ditafsirkan dalam bentuk bahan magnetik, yang dijadikan sebagai dasar dalam menentukan keadaan geologi dengan mempertimbangkan variasi arah dan vektor magnetisasi^[23].

II.3.1 Gaya Magnet

Charles Augustin de Coulomb pada tahun 1785 menyatakan bahwa gaya magnet berbanding terbalik terhadap kuadrat jarak antara dua muatan magnetik, yang persamaannya mirip hukum gaya gravitasi Newton. Dengan demikian, apabila dua buah kutub q_1 dan q_2 dari magnet yang berlainan terpisah pada jarak r , maka persamaan gaya magnet dinyatakan pada Persamaan II.1.

$$\mathbf{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{q_1 q_2}{r^2} \right) \hat{r} \quad (\text{II.1})$$

dengan \mathbf{F} adalah gaya magnet pada q_1 dan q_2 , \mathbf{r} adalah vektor satuan berarah dari q_1 ke q_2 , μ adalah permeabilitas medium magnetik (untuk ruang hampa $\mu = 1$). Gaya magnet \mathbf{F} per satuan muatan q didefinisikan sebagai kuat medan magnet terukur (\mathbf{H}). Dengan demikian dihasilkan kuat medan magnet dapat dinyatakan pada Persamaan II.2,

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{F}}{q} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{q}{r^2} \right) \hat{r} \quad (\text{II.2})$$

dengan \mathbf{H} adalah kuat medan magnet terukur. Jika suatu benda terinduksi oleh medan magnet \mathbf{H} , maka besar intensitas magnet yang dialami oleh benda tersebut dinyatakan dalam Persamaan II.3.

$$\mathbf{M} = \mathbf{m}/V \quad (\text{II.3})$$

dengan \mathbf{M} adalah intensitas magnetisasi, \mathbf{m} adalah momen dipol, dan V adalah volume. Satuan magnetik dalam SI adalah Am^{-1} sedangkan dalam cgs adalah Gauss [23].

II.3.2 Suseptibilitas Magnetik

Suseptibilitas magnet adalah kemampuan suatu material termagnetisasi yang ditentukan oleh nilai suseptibilitas kemagnetan. Faktor yang mempengaruhi nilai suseptibilitas magnet suatu material adalah litologi batuan dan kandungan mineral batuan.

Suseptibilitas magnetik digunakan untuk menentukan derajat suatu material magnetik untuk mampu termagnetisasi^[23]. Pada penerapan aplikasi geofisika, metode magnetik ini akan tergantung pada pengukuran langsung yang didapatkan dari anomali medan magnet lokal yang dihasilkan dari variasi intensitas magnetisasi dalam formasi batuan di wilayah tersebut. Sebagian intensitas magnetik pada material batuan disebabkan magnetisasi permanen yang dihasilkan dari induksi magnet bumi dan yang lainnya. Intensitas induksi magnet sendiri bergantung pada suseptibilitas suatu batuan serta gaya magnetnya. Suseptibilitas magnetik dirumuskan seperti Persamaan II.4.

$$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H} \tag{II.4}$$

Dengan χ adalah nilai suseptibilitas suatu bahan dan tidak memiliki dimensi. Nilai χ 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^[23]. Nilai suseptibilitas magnetik suatu batuan dan mineral dapat dilihat pada Tabel II.1 dan Tabel II.2.

Tabel II.1 Nilai suseptibilitas magnet batuan^[23]

Jenis Mineral / Batuan	Suseptibilitas (10^{-3})	
	Interval	Rata-rata
Batuan sedimen		
Dolomit	0-0,9	0,1

Batu kapur	0-0,3	0,3
Batu pasir	0-20	0,4
Lempung	0,01-15	0,6
Rata-rata sedimen	0-18	0,9
Batuan metamorf		
Amfibolit		0,7
Sekis	0,3-3	1,4
Philite		1,5
Gneiss	0,1-25	
Kuarsit		4
Serpentine	3-17	
Slate	0-35	6
Rata-rata metamorf	0-70	4,2
Batuan beku		
Granit	0-50	2,5
Riolit	0,2-35	
Dolorit	1-35	17
Augit-senit	30-40	
Olivin/diabas		25
Diabas	1-160	55
Porpiri	0,3-200	60
Gabro	1-90	70
Basal	0,2-175	70
Diorit	0,6-120	85
Piroxenit		125
Peridotit	90-200	150
Andesit		160
Rata-rata beku asam	0-80	8
Rata-rata beku basa	0,5-97	25
Mineral		
Grafit		0,1
Quartz		-0,01
Anidrite, batu kapur		-0,01
Calsit	(-0,001)- (-0,01)	
Batu bara		0,02
Tanah liat		0,2
Chalcopyrit		0,4
Sphalerit		0,7
Cassiterit		0,9

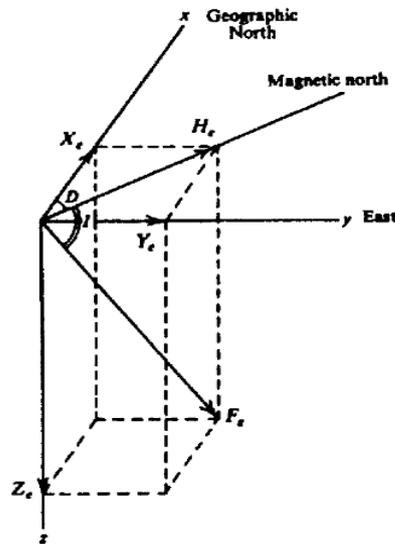
Siderit	1-4	
Pirit	0,05-5	1,5
Limonit		2,5
Arsenopirit		3
Hematit	0,5-35	6,5
Chromit	3-110	7
Franklinit		430
Pirhotit	1-6000	1500
Ilmenit	300-3500	1800
Magnetit	1200-19200	6000

Tabel II.2 Nilai suseptibilitas magnetik^[24]

No.	Batuan	Suseptibilitas (10^{-3} SI)
1	Lava andesit	0.02-0.04
2	Breksi	0.01-0.03
3	Alterasi lempung	0.01-0.03
4	Bongkah silisifikasi	0.00-0.02
5	Aliran piroklastik	0.03-0.11
6	Lava dasitik	0.00-0.02
7	Andesit piroksen	1.00-1.20
8	Andesit terubah	0.07-0.11
9	Lampung kaolin	0.00-0.002

II.4 Medan Magnet Bumi

Komponen medan magnet bumi biasa disebut elemen medan magnet bumi yang mempunyai tiga arah utama dan dinyatakan dalam koordinat kartesian (Gambar II.5), yaitu komponen arah utara X_e , komponen arah timur Y_e , dan komponen arah ke bawah Z_e .



Gambar II.5 Elemen medan bumi^[23]

Medan magnetik bumi terkarakterisasi oleh parameter fisis atau dapat disebut dengan elemen medan magnet bumi^[23]. Parameter (elemen) fisis tersebut terdiri dari :

1. Deklinasi (D) yaitu sudut utara magnet bumi dengan komponen horizontal yang dihitung dari utara menuju timur (sudut antara utara magnet dan utara geografis),
2. Inklinasi (I) yaitu sudut antara medan magnet total dengan bidang horizontal yang dihitung dari horizontal menuju ke bidang vertikal ke bawah (sudut antara bidang horizontal dan vektor medan total), intensitas horizontal (H_e) adalah magnitude dari medan magnet total pada arah horizontal, dan
3. Medan magnet total (F_e) adalah magnitudo dari vektor magnet total.

Sumber medan magnet bumi secara umum dibagai menjadi tiga, yaitu medan magnet utama bumi (*main field*), medan luar (*external field*) dan medan anomali (*anomaly field*)^[23]:

II.4.1 Medan Magnet Utama Bumi

Medan magnetik dari dalam bumi bersumber dari perputaran aliran arus yang berada pada lapisan inti luar bumi yang bersifat cair dan konduktif. Medan utama bumi berubah terhadap waktu, sehingga untuk menyeragamkan nilai-nilai medan

utama bumi dibuat standar nilai yang disebut *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) yang diperbaharui setiap 5 tahun sekali. Nilai-nilai IGRF diperoleh dari hasil pengukuran rata-rata pada daerah luasan sekitar 1 juta km² dalam waktu satu tahun. Nilai medan magnet utama ini ditentukan berdasarkan kesepakatan internasional dibawah pengawasan *International Association of Magnetic and Aeronomy* (IAGA)^[23].

II.4.2 Medan Magnet Luar

Medan magnet luar berasal dari pengaruh luar bumi yaitu hasil ionisasi di atmosfer yang ditimbulkan oleh sinar ultraviolet dari matahari. Sumber medan luar ini berhubungan dengan arus listrik yang mengalir dalam lapisan terionisasi di atmosfer, sehingga perubahan medan ini terhadap waktu jauh lebih cepat^[23]. Beberapa sumber medan magnet dari luar antara lain:

- a. Perubahan konduktivitas listrik lapisan atmosfer dalam siklus 11 tahun.
- b. Variasi harian dengan periode 24 jam yang berhubungan dengan pasang surut matahari dan mempunyai jangkauan 30 nT.
- c. Variasi harian dengan periode 25 jam yang berhubungan dengan pasang surut bulan dan mempunyai jangkauan 2 nT.
- d. Badai geomagnet yang bersifat acak dan mempunyai jangkauan sampai dengan 1.000 nT.

II.4.3 Anomali Medan Magnet

Anomali medan magnetik atau lebih dikenal dengan medan magnet lokal dihasilkan oleh batuan yang mengandung mineral bermagnet yang berada di kerak bumi. Secara garis besar anomali ini disebabkan oleh medan magnetik remanin dan medan magnet induksi. Bila arah medan magnet remanin sama dengan arah medan magnet induksi maka anomalnya bertambah besar, demikian juga sebaliknya. Medan magnet remanin mempunyai peranan yang besar pada magnetisasi batuan yaitu ada besar dan arah medan magnetnya serta sangat rumit diamati karena berkaitan dengan peristiwa kemagnetan yang dialami sebelumnya. Sisa

kemagnetan ini disebut dengan *Normal Residual Magnetism* yang merupakan akibat magnetisasi medan utama^[23].

Anomali yang diperoleh dari survei merupakan hasil gabungan dari keduanya, bila arah medan magnet remanen sama dengan arah medan magnet induksi maka anomalnya bertambah besar, demikian pula sebaliknya. Dalam survei magnetik, adanya anomali magnetik menyebabkan perubahan medan magnet total bumi dan dapat dituliskan seperti Persamaan II.5.

$$\Delta H = H_p - H_{IGRF} \pm H_d \quad (\text{II.5})$$

Dimana ΔH merupakan anomali magnetik, H_p adalah medan magnet hasil pengukuran, H_{IGRF} adalah medan magnet teoritis koreksi IGRF, dan H_d adalah koreksi diurnal.

II.5 Metode Geomagnet

Metode geomagnet merupakan salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengetahui sifat-sifat magnetik batuan di bawah permukaan bumi akibat pengaruh dari batuan yang termagnetisasi. Salah satu pengukuran yang dapat dilakukan pada metode geomagnet adalah untuk mengukur variasi medan magnetik di permukaan bumi. Metode ini bekerja berdasarkan pengukuran variasi kecil intensitas medan magnet di permukaan bumi yang disebabkan karena perbedaan antar sifat magnetisasi batuan di kerak bumi sehingga meningkatkan munculnya medan magnet bumi yang tidak homogen atau disebut anomali magnetik. Variasi intensitas medan magnet terukur dijadikan sebagai penafsiran distribusi magnetik batuan yang ada di bawah permukaan dan kemudian dapat menjadi dasar pendugaan kondisi geologi daerah tersebut^[25].

Pada survei panas bumi, metode geomagnet digunakan untuk mengidentifikasi tipe batuan beku atau *hot rock* yang berperan sebagai sumber panas. Secara garis besar terdapat dua sistem sumber panas yaitu sistem vulkanik aktif dan sistem selain vulkanik. Daerah panas bumi dengan tipe vulkanik aktif memiliki temperatur tinggi lebih dari 180°C. Temperatur tinggi akan mengakibatkan demagnetisasi pada batuan yang mengakibatkan nilai anomali

magnetik menjadi rendah. Tipe vulkanik tidak aktif akan memungkinkan nilai anomali magnetik bernilai tinggi karena tidak terdapat proses demagnetisasi yang menghilangkan sifat kemagnetan batuan. Oleh karenanya tipe batuan sumber panas akan lebih mudah terdeteksi melalui metode magnetik [26].

Variasi medan magnet di suatu daerah dapat digunakan sebagai studi awal untuk kegiatan eksplorasi panas bumi. Pada umumnya batuan panas bumi memiliki nilai kerentanan magnetik yang rendah dibandingkan batuan lain yang berada di sekitarnya, hal ini dikarenakan perekaman magnetisasi oleh alterasi hidrotermal sehingga mengubah mineral yang ada menjadi mineral yang memiliki kerentanan magnetik yang kecil.

Dalam akuisisi data magnetik dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu secara *looping* dan *base rover*. Perbedaan dalam beberapa cara tersebut hanya di tekankan dalam penggunaan magnetometer dalam pengukuran.

1. *Looping*

Pengukuran yang dimulai dari *base* dan di akhiri di *base* lagi. Kelebihan pengukuran *looping* ini ialah menggunakan satu alat magnetometer yang menjadi *base* dan *rover*. Dimana sekaligus pengukuran *looping* ini mencatat nilai variasi harian dan intensitas medan magnet total. Peletakan kedudukan *base* tidak boleh sembarangan karena harus mencakupi seluruh lintasan *rover*, jika hal ini tidak dilakukan maka data *rover* yang berada jauh atau diluar area *base* maka akan sulit diadakan kontrol data. Misalnya terdapat beberapa lintasan maka peletakan *base* harus berada disekitar lintasan tersebut, sehingga dari data yang didapatkan akan terdapat hubungan antara *base* dan *rover* yang akan dilakukan koreksi berdasarkan variasi harian.

2. *Base Rover*

Pengukuran yang menggunakan dua buah alat magnetometer dimana satu buah untuk pengambilan data *base* yang penempatan alat magnetometer tersebut di tempatkan pada tempat yang bebas dari *noise* guna mencatat nilai variasi harian dan tetap sedangkan satunya untuk pengambilan data di lapangan guna mencatat intensitas medan total dari tiap lintasan. Pada survei geomagnetik *base-rover* salah satu alat dari magnetik terletak pada titik *base* yang berfungsi sebagai pengontrol

data karena variasi harian. Peletakan kedudukan *base* tidak boleh sembarangan karena harus mencakupi seluruh lintasan *rover* sama seperti pengukuran *looping* agar terdapat hubungan antara *base* dan *rover*.

Pengukuran data magnetik pada penelitian ini digunakan metode *looping*. Pengukuran metode ini menggunakan satu alat saja dan pengoperasian yang mudah dibandingkan metode *base-rover*. Untuk memperoleh nilai anomali medan magnetik yang diinginkan, maka perlunya dilakukan koreksi terhadap nilai medan magnetik total yang didapatkan di lapangan.

II.5.1 Variasi Harian

Variasi harian adalah representasi gangguan terhadap medan magnet regional karena adanya sumber medan magnet luar dalam nT, sehingga untuk mendapatkan nilai variasi harian (Persamaan II.6)^[27].

$$H_d = \frac{t_n - t_a}{t_b - t_a} (T_b - T_a) \quad (\text{II.6})$$

Dengan H_d adalah koreksi harian, t_n adalah waktu saat pengukuran dalam detik, t_a adalah waktu terukur di *base* awal dalam detik, t_b adalah waktu terukur di *base* akhir dalam detik, T_b adalah nilai medan magnet total pada *base* akhir dalam nT, dan T_a adalah nilai medan magnet total pada *base* awal dalam nT.

II.5.2 Koreksi IGRF

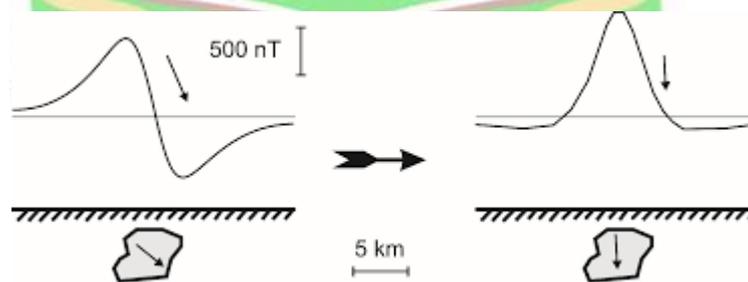
Nilai IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) merupakan nilai medan magnet utama bumi. Nilai medan magnet utama ini berasal dari aktivitas inti bumi yang berubah dengan sangat lamban. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh perbedaan nilai IGRF di rentang waktu tertentu. Koreksi IGRF ini perlu dilakukan karena memiliki pengaruh besar terhadap data yang terekam saat akuisisi data. Koreksi ini dilakukan dengan cara mengurangkan nilai medan magnet yang terbaca dengan IGRF daerah tersebut^[27]. Nilai IGRF untuk setiap waktu dan lokasi tersedia di salah satu situs resmi National Geophysical Data Center (NGDC) yaitu: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>. Untuk mendapatkan nilai IGRF ini perlu memasukan koordinat, ketinggian dan waktu saat akuisisi data.

II.6 Transformasi Medan

Anomali medan magnet total merupakan gabungan dari anomali regional dan anomali residual serta dipol-dipol magnet yang didapatkan dari hasil koreksi IGRF dan variasi harian. Anomali tersebut saling berinteraksi dan menimbulkan anomali yang tumpang tindih sehingga sulit untuk ditafsirkan. Oleh sebab itu, anomali-anomali tersebut harus saling dipisahkan untuk mengetahui dan mendeteksi benda-benda dan kondisi dibawah permukaan yang menyebabkan anomali tersebut.

II.6.1 Reduksi ke Kutub

Baranov dan Naudy dalam Blakely mengembangkan metode transformasi untuk menyederhanakan interpretasi data magnet pada daerah berlintang rendah dan menengah yang dikenal dengan reduksi ke kutub^[28]. Transformasi ini perlu dilakukan karena adanya perbedaan nilai inklinasi dan deklinasi dari setiap titik pengambilan data magnetik dari setiap daerah. Reduksi ke kutub dilakukan dengan cara membuat sudut inklinasi menjadi 90° dan deklinasi 0° seperti yang ditunjukkan Gambar II.6. Proses transformasi reduksi ke kutub dapat mengurangi satu tahap kompleks dari proses interpretasi, di mana anomali medan magnet menunjukkan langsung posisi bendanya. Proses transformasi ini dilakukan dengan mengubah arah magnetisasi dan medan utama dalam arah vertikal.



Gambar II.6 Anomali magnetik sebelum dan sesudah reduksi ke kutub^[28]

Pada metode reduksi ke kutub ada proses transformasi, yang dilakukan dengan mengaplikasikan *Fast Fourier Transform* (FFT) sebagai berikut^[28].

$$F[T_r] = F[\psi_r] F[\Delta T] \quad (\text{II.7})$$

Dimana

$$F[\psi_r] = \frac{1}{\theta_m \theta_f}$$

$$= \frac{|k|^2}{a_1 k_x^2 + a_2 k_y^2 + a_3 k_z^2 + i|k|(b_1 k_x + b_2 k_y)}, |k| \neq 0$$

$$a_1 = m_z f_z - m_x f_x$$

$$a_2 = m_z f_z - m_y f_y$$

$$a_3 = -m_z f_x - m_x f_y$$

$$b_1 = m_z f_z + m_x f_x$$

$$b_2 = m_y f_z + m_z f_y$$

$F[\psi_r]$ adalah Transformasi Fourier reduksi ke kutub. $F[\Delta T_r]$ adalah Transformasi Fourier anomali medan magnet yang diukur. $F[\Delta T]$ adalah Transformasi Fourier anomali medan magnet yang diabaikan oleh magnetisasi sumbernya. K adalah bilangan gelombang (*wave number*). θ_m adalah fungsi kompleks magnetisasinya. θ_f adalah fungsi kompleks medan magnet utama. $m_{(x,y,z)}$ adalah vektor dalam arah magnetisasi (x,y,z) dan $f_{(x,y,z)}$ adalah vektor satuan dalam arah medan utama (x,y,z)^[28].

II.6.2 Kontinuitas ke Atas

Kontinuitas ke atas dilakukan dengan mentransformasikan medan potensial yang diukur pada permukaan tertentu menuju ke medan potensial pada permukaan lain yang jauh dari sumber. Transformasi ini mengurangi anomali sebagai fungsi panjang gelombang. Semakin pendek panjang gelombang maka semakin besar atenuasinya. Konsep dasar dari transformasi ini berasal dari identitas ketiga teorema Green. Teorema ini menjelaskan bahwa apabila suatu fungsi U adalah harmonik, kontinyu, dan mempunyai turunan yang kontinyu di sepanjang daerah, maka nilai U pada suatu titik di dalam daerah R (Gambar II.7) dapat dinyatakan dengan Persamaan II.8^[28]:

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} \right) dS \quad (\text{II.8})$$

dengan S menunjukkan permukaan daerah R , n menunjukkan arah normal keluar, dan r adalah jarak dari titik P ke suatu titik permukaan S . Dengan menggunakan sistem koordinat kartesius dengan sumbu z mengarah ke bawah, asumsikan bahwa medan potensial diukur pada permukaan datar pada $z = z_0$ dan bahwa medan diinginkan pada satu titik $P(x, y, z_0 - \Delta z)$ di atas permukaan. permukaan, di mana $\Delta z > 0$. Permukaan S terdiri dari kedua permukaan datar ditambah belahan berjari-jari a , seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.7.

$$U(x, y, z - \Delta z) = \frac{|\Delta z|}{2\pi} \int_{-a}^a \int_{-a}^a \frac{(x', y', z_0')}{R^3} dx' dy' \quad (\text{II.9})$$

dengan,

$$R = |x - x'|^2 + |y - y'|^2 + \Delta z^2$$

$U(x, y, z_0)$: harga medan potensial pada bidang hasil kontinuasi

Δz : jarak atau ketinggian pengangkatan

$U(x', y', z_0)$: harga medan potensial pada bidang observasi sebenarnya ($\Delta z = 0$)

Persamaan II.9 menjelaskan prinsip dasar dari kontinuasi ke atas, bahwa suatu medan potensial dapat dihitung pada setiap titik di dalam suatu daerah berdasarkan sifat medan magnet pada permukaan yang melingkupi daerah tersebut.

Dalam aplikasinya, Persamaan II.9 masih dalam bentuk domain spasial, sulit untuk diimplementasikan karena harus diketahui pasti harga medan potensial di setiap titik pada bidang hasil pengangkatan. Kontinuasi keatas akan lebih efisien dan memberikan arti jika dilakukan dalam domain Fourier seperti pada Persamaan umum berikut^[28].

$$F(U_u) = F(U) \cdot F(\varphi_u) \quad (\text{II.10})$$

Dengan

$F(U_u)$: hasil medan potensial pada bidang kontinuasi dalam domain Fourier

$F(U)$: medan potensial pada bidang kontinuasi dalam domain Fourier

$F(\varphi_u)$: fungsi transfer dari kontinuasi keatas domain Fourier

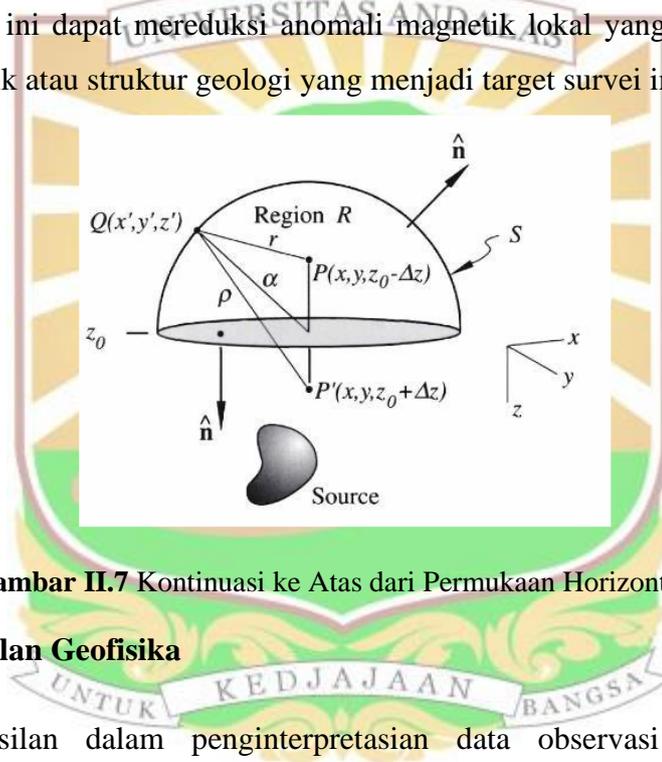
Dimana

$$\varphi_u(k) = e^{-zk} \quad (\text{II.11})$$

Dari Persamaan II.11 diatas dapat diketahui bahwa

1. Proses kontinuitas ke atas akan mengalami atenuasi di setiap bilangan gelombang (k) kecuali pada $k=0$
2. Setiap bilangan gelombang diatenuasi dengan tingkat derajat yang lebih besar dibanding bilangan gelombang yang lebih kecil
3. Derajat atenuasi semakin besar dengan pengangkatan dengan nilai yang besar.

Pada metode *Upward Continuation*, proses pengangkatan tidak boleh terlalu tinggi, karena ini dapat mereduksi anomali magnetik lokal yang bersumber dari benda magnetik atau struktur geologi yang menjadi target survei ini.



Gambar II.7 Kontinuitas ke Atas dari Permukaan Horizontal^[28]

II.7 Pemodelan Geofisika

Keberhasilan dalam penginterpretasian data observasi lapangan dan kecocokan dalam pemodelan struktur bawah permukaan tentu tidak terlepas dari ketepatan dalam melakukan pemodelan geofisika. Pemodelan geofisika merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi. Pemodelan geofisika terdiri dari dua jenis yaitu^[29]:

II.7.1 Pemodelan ke Depan (*forward modelling*)

Pemodelan ke depan (*forward modeling*) merupakan proses perhitungan data yang secara teoritis akan teramati di permukaan bumi jika diketahui parameter

model bawah permukaannya. Perhitungan data teoritis tersebut menggunakan persamaan matematis yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau. Dalam interpretasi data geofisika, dicari suatu model yang menghasilkan response yang cocok atau fit dengan data pengamatan atau data lapangan. Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data.

Untuk memperoleh kesesuaian antara data teoritis (respons model) dengan data lapangan dapat dilakukan proses coba-coba (trial and error) dengan mengubah-ubah harga parameter model. Seringkali istilah pemodelan ke depan atau forward modeling digunakan untuk menyatakan pemodelan data coba-coba tersebut. Dengan kata lain, istilah forward modeling tidak hanya mencakup perhitungan respons modeling tetapi juga proses coba-coba untuk memperoleh model yang memberikan respon yang cocok dengan data. Adanya informasi tambahan dari data geologi atau data geofisika lainnya dapat membantu penentuan model awal. Modifikasi model dengan cara tersebut dilakukan secara iteratif hingga dicapai kesesuaian antara data dan respons model^[29].

II.7.2 Pemodelan Inversi (*inverse modelling*)

Pemodelan inversi sering dikatakan sebagai kebalikan dari pemodelan kedepan karena dalam pemodelan inversi, parameter model diperoleh langsung dari data. Proses inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan. Di dalam proses inversi, kita melakukan analisis terhadap data lapangan dengan cara melakukan *curve fitting* (pencocokan kurva) antara model matematika dan data lapangan. Tujuan dari proses inversi adalah untuk mengestimasi parameter fisis batuan yang tidak diketahui sebelumnya (*unknown parameter*)^[29].

II.8 Geologi Daerah Penelitian

Secara administratif, daerah panas bumi G.Talang termasuk kedalam wilayah Kabupaten Solok, Propinsi Sumatera Barat, pada posisi geografis terletak antara

pada posisi geografis terletak antara $100^{\circ}35'30''$ - $100^{\circ}44'30''$ Bujur Timur dan $0^{\circ}52'00''$ - $0^{\circ}59'05''$ Lintang Selatan . Di daerah tersebut terdapat Gunung api yaitu Gunung api Batino dimana merupakan bagian dari gunung api gunung talang tua (2450 m dpl). Gunung api strato ini disusun oleh perselingan antara batuan piroklastika dan lava. Dan juga terdapat sebuah danau yaitu Danau Talang dimana danau tersebut merupakan bekas pusat erupsi dimasa lampau, hal ini diperkuat dengan dijumpainya batu berstruktur kerak roti dan dijumpai batuan teralterasi daerah tepi danau^[1].

II.8.1 Geologi Regional

Pada peta geologi daerah penelitian (Gambar II.8) batuan didominasi oleh batuan produk vulkanik yang terdiri dari lava dan piroklastik dan sebagian batuan metamorf yang tersingkap di bagian Timurlaut daerah penelitian yang diduga sebagai batuan dasar di daerah penelitian. Secara garis besar pembagian satuan batuan tersebut dari tua kemuda adalah sebagai berikut: batuan metamorf sebagai batuan dasar (*Basement rock*) batuan vulkanik tua, batuan vulkanik produk Bukit Bakar, batuan vulkanik produk Talang Purba (Danau Talang), batuan vulkanik produk Batino dan batuan produk Gunung Jantan serta endapan permukaan^[1].

Batuan tertua yang dianggap sebagai batuan dasar (*basement rock*) di daerah penyelidikan dijumpai di bagian baratdaya (Bk. Putus) dan timurlaut (Bk. Muncung), yang disusun oleh batuan metamorf yang berumur Pra-Tersier. Selanjutnya secara tak selaras diendapkan batuan vulkanik tua yang terdiri dari aliran piroklastika dan aliran lava yang tak terpisahkan, tersebar di bagian barat dan timur daerah penyelidikan, berumur Quarter Bawah sampai Tersier Atas. Di bagian utara terdapat dua bukit, yaitu Bk. Kili Kecil dan Kili Gadang, bukit tersebut diperkirakan sebagai intrusi yang pemunculannya dipicu oleh keberadaan sesar normal Batu Barjanjang. Di sekitar Bk. Kili Gadang dan Kili Kecil tersebut terdapat pemunculan mata air panas bertemperatur 40 dan 49°C dengan $\text{pH} = 7$ (netral). Batuan produk Bk. Bakar tersebar di bagian timur daerah penyelidikan yang tersusun dari piroklastika dan lava andesitik, sebagian besar telah terlapukan sangat kuat. Di bagian tengah daerah penyelidikan terdapat Danau Talang, yang diduga

sebagai bekas pusat erupsi masa lampau, hal ini diperkuat dengan ditemukannya batuan berstruktur kerak roti (bread cracks) di sekitar tepi danau tersebut dan batuan teralterasi. Pusat erupsi yang sekarang berupa danau kawah (crater lake) ini diperkirakan dipicu oleh keberadaan struktur sesar normal Danau Talang yang berarah barat-laut-tenggara. Kemudian muncul G. Batino yang diperkirakan sebagai bagian dari Gunungapi Talang tua (2450 m dpl). Gunungapi strato ini disusun oleh perselingan antara batuan piroklastika dan lava. Ditemukannya batuan piroklastika dengan penyebaran yang cukup luas di bagian utara, diduga merupakan hasil erupsi yang cukup kuat terjadi dalam sejarah letusannya, menyisakan dinding kaldera di bagian timur dan selatan kawah Batino. Produk termuda batuan vulkanik berasal dari G. Jantan yang merupakan kerucut termuda dari Gunungapi Talang (2600 m dpl). Satuan batuan produk Gunung Jantan tersebar di bagian utara, yang disusun oleh lava andesitik dan aliran piroklastika^[1].

II.8.2 Stratigrafi Daerah Penelitian

Penyusunan satuan batuan penyusun stratigrafi di daerah penyelidikan pada Gambar II.8 dapat dibagi menjadi delapan kelompok satuan batuan yang secara berturut-turut dari tua ke muda adalah sebagai berikut^[8]:

1. Formasi Tuhur (Trtv)

Satuan ini tersingkap baik di daerah Bukit Muncung sebelah timurlaut daerah penelitian. Satuan batuan ini tersusun atas batuan malihan derajat rendah berjenis filkit berwarna abu-abu, gelap-hitam dan sebagian lapuk berwarna coklat-kemerahan, berukuran butir lempung-lanau, memperlihatkan foliasi yang jelas, banyak dijumpai kekar-kekar. Batuan malihan ini ditafsirkan sebagai batuan dasar di daerah penyelidikan yang dikelompokkan ke dalam formasi Tuhur yang berumur pra-Tersier.

2. Satuan vulkanik tua (TTi)

Penyebaran dari satuan vulkanik tua ini tersebar cukup luas menempati bagian barat, timur, dan selatan daerah penyelidikan. Satuan batuan ini merupakan batuan vulkanik tak terpisahkan tersusun atas lava dan piroklastik. Satuan Batuan vulkanik tua ini berumur Quarter bawah sampai tersier atas (Plistosen-Pliosen).

3. Batuan vulkanik Bukit kili (QKj)

Satuan batuan ini di lapangan berupa bukit-bukit terisolisir yang diwakili oleh bukitkili gadang dan Kili Kecil. Batuan penyusun di Bukit Kili Gadang dan Kili Kecil berupa Batuan beku.

4. Produk vulkanik Bukit Bakar (QUlh)

Batuan-batuan produk vulkanik bukit bakar ini tersebar dibagian timur daerah peneitian, yang merupakan hasil erupsi bukit bakar. Produk vulkanik bukit bakar ini terpisahkan menjadi lima satuan batuan yang terdiri dari dua satuan lava dan tiga satuan aliran piroklastik.

5. Produk Vulkanik Batino (QB)

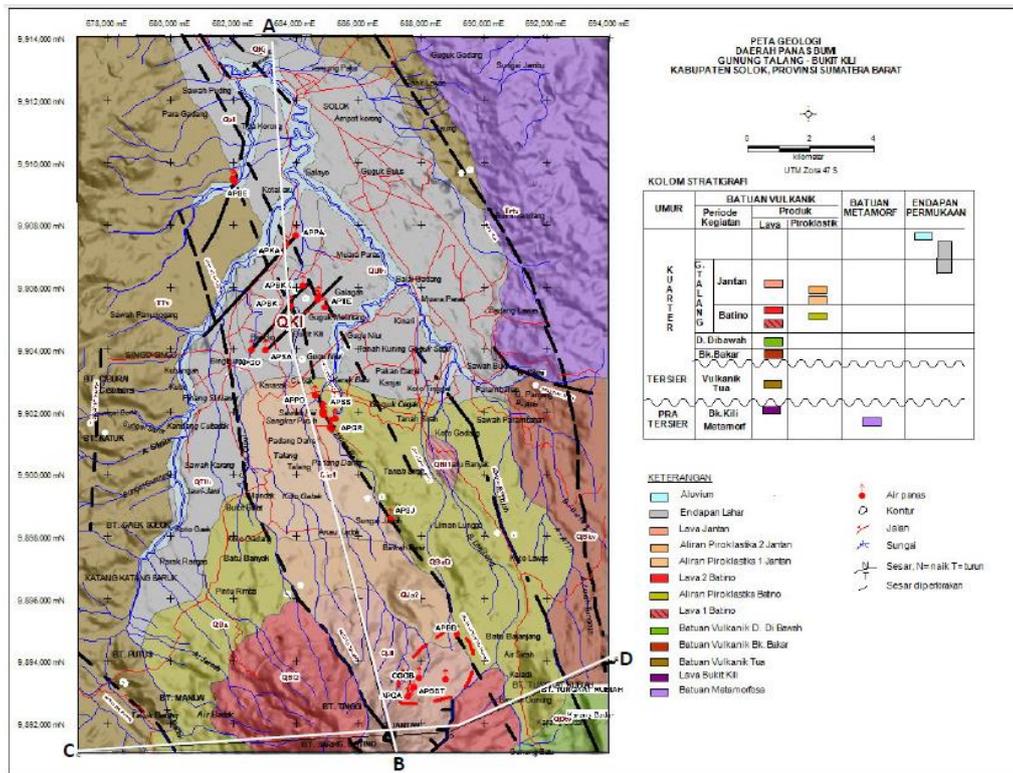
Gunung Batino ditafsirkan sebagian dari Gunung Talang tua dengan titik tertinggi 2.450 m di bawah permukaan laut. Gunung Batino merupakan Gunungapi bertipe strato dengan produk batuanya merupakan perselingan antara piroklastik dan lava. Satuan batuan dapat dipisahkan menjadi dua satuan lava dan satu aliran piroklastik.

6. Produk Vulkanik Jantan (QJ)

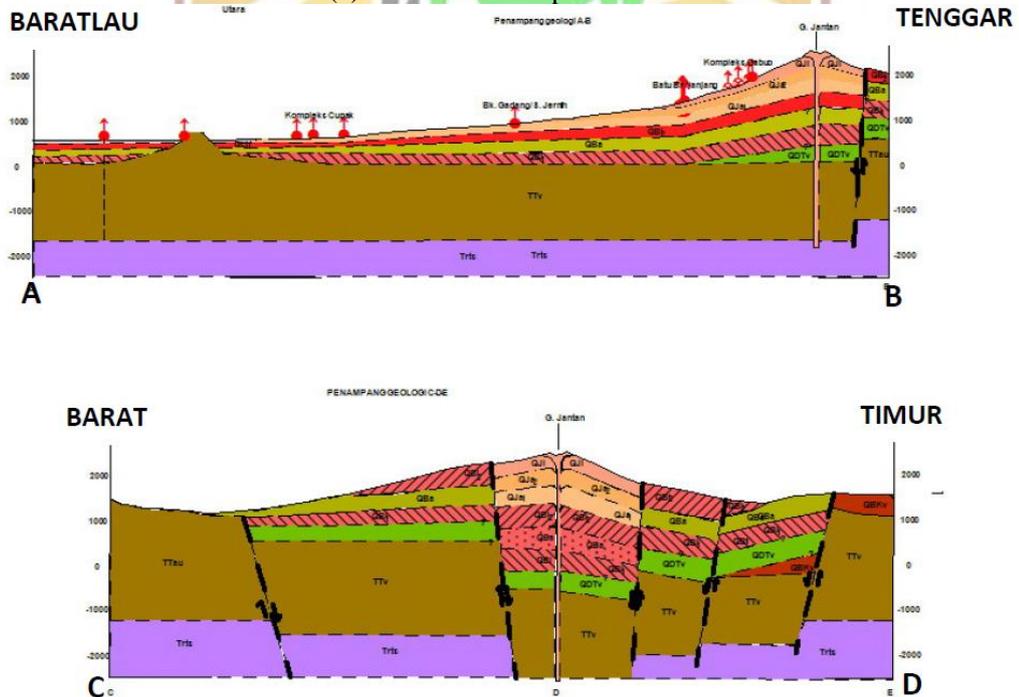
Penyebaran batuan vulkanik produk Gunung jantan dikontrol oleh keberadaan struktur baik sesar maupun sisa dinding kawah batino. Struktur sesar danau Talang Dan sesar batu baranjang sangat berperan dalam mengontrol penyebaran satuan batuan produk Gunung Jantan dibagian Utara. Produk vulkanik jantan ini terdiri dari dua satuan aliran piroklastik dan satu satuan lava.

7. Endapan permukaan (QTlh)

Satuan endapan permukaan ini menempati bagian utara daerah penyelidikan yang umumnya beleranf relatif landai. Penyusun batuan ini terdiri dari material-material vulkanik tua yang terombakkan yang bersifat laharik. Endapan lahar ini berwarna abu-abu kecoklatan, komponen terdiri dari batuan beku/lava andesitik.



(a) formasi batuan permukaan



(b) formasi batuan bawah permukaan

Gambar II.8 Peta geologi daerah panas bumi Gunung Talang [4]