

## **BAB II LANDASAN TEORI**

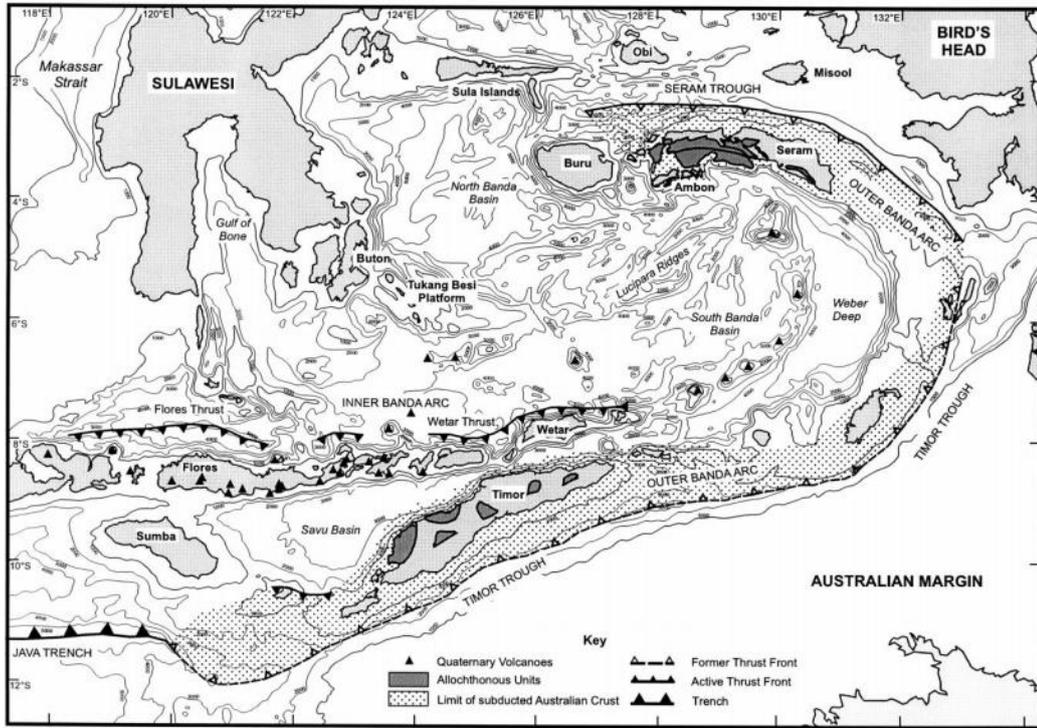
### **2.1 Geologi Regional**

Pulau Nusa Tenggara atau pulau yang dikenal sebagai Kepulauan Sunda kecil secara fisik, dikelilingi oleh Pulau Jawa di bagian barat, Kepulauan Banda di bagian timur, Laut Flores dibagian utara dan Samudera Hindia di bagian selatan. Secara geologis Pulau Nusa Tenggara berada di busur Banda. Rangkaian vulkanik muda yang mendominasi merupakan penyusun Pulau Nusa Tenggara. Menurut teori lempeng tektonik, Pegunungan di Nusa Tenggara berada tepat di zona subduksi Indo-Australia pada kerak samudra dan memiliki kedalaman magma yang diduga berkisar 165 – 20 km (Hamilton, 1979).

Kepulauan Nusa Tenggara sebagian besar busurnya terbentuk akibat zona subduksi yang terjadi antara Lempeng Indo-Australia yang letaknya dibawah busur Sunda-Banda pada zaman Tersier. Sehingga akibat dari zona subduksi ini membentuk jalur busur vulkanik yang ada di Kepulauan Nusa Tenggara. Perbedaan kandungan kimia pada lava menyebabkan pembatasan antara busur vulkanik pada bagian timur wilayah Sunda dan kerak samudera. Hamilton (1979) menjelaskan bahwa Pegunungan Nusa Tenggara bagian barat terbentuk pada zaman Senozoikum. Batuan vulkanik yang berumur lebih tua dari Miosen awal telah ditemukan didalam busur Banda, Kepulauan Nusa Tenggara dengan kedalaman 150 km dibawah zona gempa. Wilayah seismik di Jawa terbentang pada kedalaman maksimal 600 km ini menunjukkan bahwa terdapat zona subduksi litosfer bawah laut dilempeng Australia yang terletak di bawah busur Banda. Pada awal Plistosen di sebrang Timor menunjukkan adanya tabrakan dari Timor dengan Alor dan Wetar, setelah semua lautan dimusnahkan oleh zona subduksi.

Zona orogenik Timor yang terdiri dari Wetar, Alor, Kambing, dan Romang dengan pusat penggelombangan di Flores merupakan bagian dari Nusa Tenggara Timur. Siklus kompleks terjadi pada zona evolusi orogenik. Proses penggelombangan yang terjadi pada zaman Mesozoikum, termasuk didalamnya sirkum Australia yang menghasilkan busur dalam Sumba dengan konfigurasi mengarah ke timur laut serta busur luar Sawu yang mengarah ke timur laut. Pada zaman Tersier, kawasan

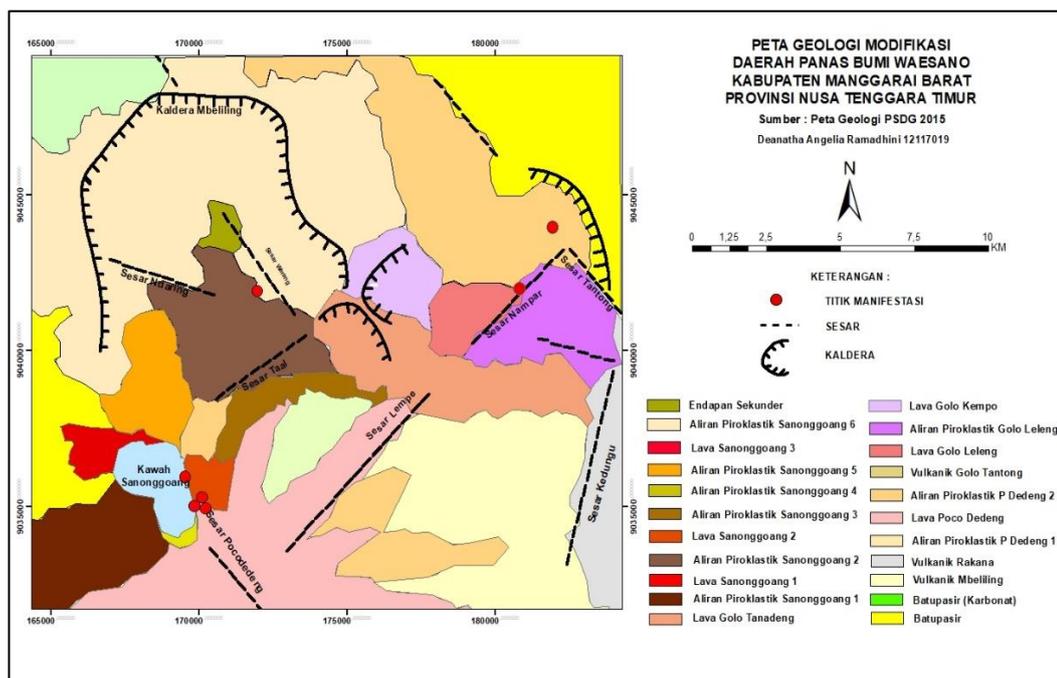
tersebut mengalami proses penggelombang dari pusatnya berada di laut Flores, sebagai bagian dari sistem pegunungan Sunda.



**Gambar 2. 1** Peta Tektonik Busur Banda (Hall, R., & Wilson, M., 2000)

## 2.2 Geologi Daerah Penelitian

Geologi daerah penelitian ini terbentuk pada Zaman Tersier pada kala Miosen – Pliosen, yang secara geologi terbentuk cekungan yang menghasilkan deposit sedimen dengan jenis batupasir. Selanjutnya kegiatan tektonik menghasilkan sesar – sesar mendatar berarah barat laut – tenggara yang merupakan struktur *basement* daerah penelitian. Di duga terjadi erupsi besar pada kala Pliosen sehingga menghasilkan Kaldera Mbeliling yang membuka bagian selatan sebagai hasil amblasan bagian selatan akibat adanya kekosongan massa. Selanjutnya pada Pliosen terbentuk vulkanisme Poco Dedeng di bagian selatan daerah penelitian yang menghasilkan lava dan aliran piroklastik. Tubuh Poco Dedeng tertutup pada bagian utaranya akibat pembentukan vulkanisme Sano Nggoang yang hingga saat ini berbentuk danau kawah dengan pH airnya yang asam.



**Gambar 2.2** Peta Geologi Daerah Panas Bumi Wae Sano yang sudah dimodifikasi berdasarkan Peta Geologi Panas Bumi Wae Sano PSDG 2015

Umur	Vulkanik				Sedimen	
	Produk	Lava	Piroklastik			Sekunder
			Aliran	Laharik		
Kuartar	Sano Nggoang	[Red]	[Orange]	[Yellow]	[Green]	
	G.Tanadereng	[Red]	[Brown]	[Brown]		
	G. Kempo	[Purple]	[Purple]	[Purple]		
	G. Leleng	[Red]	[Purple]	[Purple]		
	G. Tantong		[Yellow]	[Yellow]		
	Poco Dedeng	[Pink]	[Yellow]	[Yellow]		
	Poco Ranaka			[Grey]		
	Mbeliling	[Yellow]	[Yellow]	[Yellow]	[Green]	
Tersier				[Yellow]		

**Gambar 2.3** Tabel Stratigrafi Daerah Panas Bumi Wae Sano yang sudah dimodifikasi berdasarkan Peta Geologi Panas Bumi Wae Sano PSDG 2015

### 2.2.1 Morfologi

Geomorfologi pada daerah Wae Sano terbagi menjadi delapan satuan dan tersusun berdasarkan asprak lingkungan dan geologi daerah penelitian. Satuan geomorfologi terbagi menjadi 4 morfologi yakni morfologi curam, terjal, bergelombang, dan landau. Morfologi curam terdiri dari Tubuh Mbeliling, Golo Leleng, Watu Wangka, dan Sano Nggoang, Morfologi terjal berupa Puncak Poco Dedeng, Morfologi bergelombang berupa Tubuh Poco Dedeng, dan Morfologi landai terdiri dari Kaki Poco Dedeng.

### 2.2.2 Struktur Geologi

Berdasarkan Survei Geologi yang dilakukan oleh Tim Penyelidikan Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Geologi pada tahun 2015 analisis struktur geologi daerah penelitian dilakukan sesuai dengan hasil pengamatan lapangan dan didukung oleh data citra landsat dan peta *Digital Elevation Mode*. Pembagian struktur geologi di kelompokkan menjadi sesar sebagai akibat dari proses vulkanisme seperti terbentuknya kaldera dan kawah serta arah kelurusan sesar.

### **1. Struktur Vulkanik**

Nampak di bagian depresi Vulkanik Mbeliling, pada pembentukan kawah Sano Nggoang yang berbentuk *ellipsoid* dan di sekitar Golo Leleng yang membentuk setengah lingkaran, diduga merupakan produk eksplosif dari letusan yang bersifat asam, seperti Kaldera Mbeliling, Depresi Golo Leleng, Depresi Waemunting. Kawah Sano Nggoang terbentuk di sekitar Sano Nggoang dan berupa danau yang terisi oleh air dengan pH asam. Kawah ini merupakan hasil dari produk Sano Nggoang dan terdapat sedikitnya tiga kali proses letusan besar serta menghasilkan endapan sulfur dan mata air panas bagian tenggara danau. Kawah ini menghasilkan produk letusan berupa aliran piroklastik yang tersebar ke bagian utara danau hingga ke barat daya danau, sedangkan di bagian selatannya terhalang oleh produk yang lebih tua yang berasal dari Poco Dedeng.

### **2. Sesar Poco Dedeng**

Sesar ini berarah barat laut – tenggara yang terbentuk akibat tektonik regional yang bisa mencapai *basement* dari pembentukan geologi di daerah penelitian yang memungkinkan memfasilitasi munculnya erupsi. Sesar ini terlihat pada topografi dan kelurusan pusat erupsi produk Sano Nggoang dan Poco Dedeng yang dibuktikan dengan adanya manifestasi air panas dan silika residu.

### **3. Sesar Tantong dan Watuwangka**

Sesar ini berarah barat laut – tenggara yang membatasi batuan sedimen dan produk vulkanik Golo Tantong. Bagian selatan adalah bagian yang menurun. Daerah ini terdapat manifestasi air panas dan sejumlah sinter karbonat seperti di daerah Golo Lara.

### **4. Sesar Ndaring**

Sesar ini berarah barat laut – tenggara yang ditunjukkan oleh objek wisata air terjun Cunca Rami dengan ketinggian mencapai 50 m.

### **5. Sesar Werang**

Sesar ini berarah barat laut – tenggara yang ditarik berdasarkan kelurusan topografi dan munculnya air dingin Wae Bobok dengan temperatur 36°C.

## **6. Sesar Lempe dan Nampar**

Kelurusan sesar berarah barat daya – timur laut ini merupakan pasangan sesar yang berarah sebaliknya atau biasa disebut antitetik. Kedua sesar ini diduga merupakan jalur lemah yang memfasilitasi munculnya air panas Nampar Making dan endapan travertin dalam jumlah yang luas.

## **7. Sesar Taal**

Sesar yang berarah barat daya – timur laut ini berhubungan dengan terbentuknya depresi Waemunting dan Golo Leleng.

### **2.2.3 Stratigrafi**

Berdasarkan hasil pemetaan geologi di daerah penelitian yang dilakukan oleh Tim Penyelidikan Terdapat Pusat Sumber Daya Geologi, didapatkan bahwa daerah penelitian terbagi atas 9 satuan batuan. Urutan satuan batuan serta genesa batuan dari umur batuan tertua hingga produk erupsinya adalah sebagai berikut :

#### **1. Satuan Batupasir**

Satuan ini adalah satuan tertua dan diprediksi sebagai *basement*. Singkapan batupasir berlapis baik berada dibagian timur laut. Karbonatan, kertas padu dan terkekarkan merupakan sedimen laut berumur Miosen Tengah.

#### **2. Satuan Vulkanik Mbeliling**

Satuan ini terdiri dari batuan vulkanik berjenis *ignimbrite* yang memiliki warna abu-abu keputihan, keras dan membentuk dinding terjal yang rawan longsor, aliran piroklastik dan lava riolit yang berkomposisi lava riolit – dasit dengan warna putih – abu-abu, matriks tuf keras dan ada beberapa yang berkomposisi lapisan tuf tebal, masif dan keras.

#### **3. Satuan Vulkanik Ranaka**

Satuan ini berada dibagian tenggara dan bermorfologi kaki Ranaka dengan tataan halus dan landai. Satuan ini tersusun dari laharik dan aliran piroklastik halus dengan ukuran komponen lapilli berupa lava andesit.

#### **4. Satuan Vulkanik Poco Dedeng**

Satuan ini terletak di selatan daerah penelitian dan terbagi menjadi dua jenis berupa lava dan dua aliran piroklastik. Produk lava berjenis lava dasit berwarna abu-abu keputihan, porfiritik, *vesicular*, keras, memiliki ketebalan mencapai 3m – 4m yang ditemukan di bagian selatan Danau Sano Nggoang serta di beberapa tempat memperlihatkan struktur berlembar (*sheeting joint*). Sedangkan aliran piroklastik terbentuk di lereng bagian timur yang tersusun dari batuan vulkanik berwarna abu-abu – coklat yang mengandung dasit berukuran lapili – bongkah.

#### **5. Satuan Vulkanik Golo Tantong**

Satuan ini menempati bagian timur laut daerah penelitian yang terdiri dari batuan vulkanik dengan jenis lava basal serta aliran piroklastik yang telah ditemukan di beberapa tempat.

#### **6. Satuan Vulkanik Golo Leleng**

Satuan ini berada pada bagian tenggara dari Danau Sano Nggoang, dengan kemiringan lereng curam serta Depresi Waemunting yang membuka ke bagian selatan. Tersusun oleh batuan vulkanik jenis lava andesit.

#### **7. Satuan Lava Golo Kempo**

Satuan ini tersebar di bagian selatan dari Golo Tantong bermorfologi curam dengan depresi Golo Leleng yang membuka ke arah timur. Penyusun Satuan Lava Golo Kempo ini adalah batuan vulkanik dengan jenis lava basal yang tersingkap di jalan menuju Lembor dari arah Bambor.

#### **8. Satuan Lava Golo Tanadeng**

Satuan ini tersingkap di bagian tenggara daerah penelitian dengan morfologi curam. Tersusun dari lava berwarna abu-abu kemerahan yang tersilikasi, masif dan

teroksidasi dan aliran piroklastik dengan warna kecoklatan dibagian timur dan tertahan di sekitar Lengkongkayu.

## 9. Satuan Vulkanik Sano Nggoang

Satuan ini berada dibagian selatan daerah penelitian yang memiliki morfologi perbukitan curam – bergelombang. Produk ini melempar dari danau sebagai pusat erupsi kebagian utara sedangkan dibagian selatan tertahan oleh produk Poco Dedeng yang memiliki umur lebih tua. Produk Sano Nggoang ini terdiri dari tiga lava dan 6 aliran piroklastik dengan 5 aliran piroklastik yang sudah terelaskan/*welded*. Produk lava berjenis lava dasit dengan komposisi plagioklas, kuasa dan piroksen.

### 2.3 Teori Mengenai Metode

#### 2.3.1. Metode Gayabarat

Metode gayabarat merupakan metode yang didasarkan pada adanya variasi rapat massa batuan di bawah permukaan. Metode gayabarat mempelajari variasi medan gravitasi bumi yang memperhitungkan perbedaan massa dan jarak dari suatu titik observasi dapat diketahui. Variasi gayabarat terukur yang disebut sebagai anomali yang merupakan perbedaan dari hasil pengukuran dengan medan teoritis.

Teori gravitasi didasarkan oleh Hukum Newton tentang gravitasi yang menyatakan setiap partikel dari material dalam semesta ( $m_2$ ) akan saling tertarik terhadap partikel lainnya ( $m_1$ ) dengan gaya yang berbanding lurus ( $F$ ) dengan massa dan berbanding terbalik kuadrat dengan jaraknya ( $r$ ) Blakely (1996) seperti **Gambar 2.3**, maka gaya tarik menarik ( $F$ ) antara kedua benda tersebut dinyatakan dengan persamaan (Telford, 1990) :

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

Keterangan :

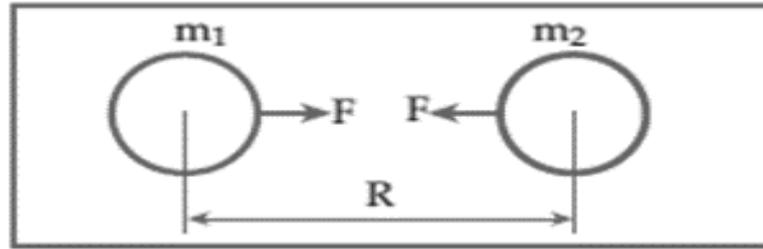
$F$  : Gaya tarik menarik antara dua benda (N)

$G$  : konstanta Gravitasi Universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ N/m}^2/\text{kg}^2$ )

$m_1$  : massa benda pertama (kg)

$m_2$  : massa benda kedua (kg)

- $r$  : jarak antar pusat kedua buah benda (m)  
 $\hat{r}$  : jarak antara kedua masaa  $m_1$  dan  $m_2$ .



**Gambar 2.4** Hukum Newton tentang gaya tarik menarik antara dua benda

### 2.3.2. Koreksi-Koreksi Pada Metode Gayaberat

Dalam pengukuran nilai percepatan gayaberat yang terukur pada alat masih terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi yaitu elevasi, topografi dalam pengukuran, posisi lintang, pengaruh pasang surut bumi, dan variasi densitas bawah permukaan (Telford, 1990). Sehingga perlu dilakukan koreksi untuk mendapatkan nilai gayaberat yang sebenarnya (sudah tidak terpengaruh oleh faktor-faktor lain). Koreksi gayaberat diantaranya adalah sebagai berikut :

#### 2.3.2.1 Koreksi Tidal (*Tide Correction*)

Koreksi Tidal dilakukan untuk menghilangkan pengaruh gaya tarik dari benda luar angkasa seperti bulan dan matahari. Gaya tarik matahari dan bulan akan berdampak pada pasang surut terhadap benda padat bumi, sehingga perlu dilakukan koreksi tidal dengan rumusan dibawah ini :

$$TiC = \frac{3\gamma r}{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{3M}{3d^2} (\sin^2 p - 1) + \frac{Mr}{d^4} (5\cos^3 p - 1\cos p) \\ + \frac{2s}{3D^3} (3\cos^2 q - 1) \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

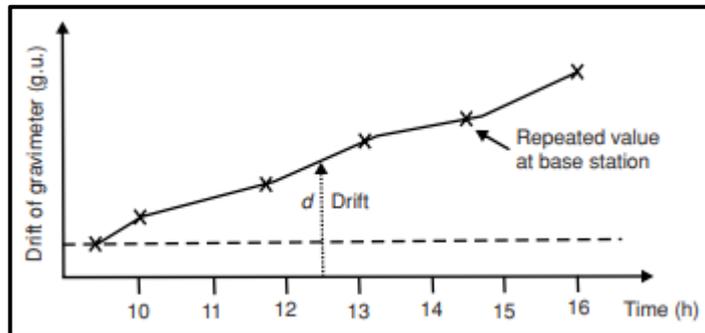
Keterangan :

- $\gamma$  = konstanta gravitasi Newton  
 $r$  = jarak pengukuran dari pusat bumi  
 $M$  = massa bulan (kg)  
 $d$  = jarak antara pusat bumi dan bulan (m)  
 $p$  = sudut zenith bulan  
 $S$  = massa matahari (kg)  
 $D$  = jarak antara pusat bumi dan matahari (m)

$q$  = sudut zenith matahari

### 2.3.2.2 Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Koreksi Apungan dilakukan karena adanya perbedaan bacaan alat di stasiun yang sama pada waktu yang berbeda, yang disebabkan karena adanya perubahan harga pegas alat gravimeter saat perjalanan dari satu stasiun ke stasiun lainnya. Skema koreksi apungan dapat dilihat pada **Gambar 2.5** berikut :



**Gambar 2.5** Koreksi Apungan (Reynolds, 1997)

Koreksi ini dilakukan dengan metode *looping*, yaitu dengan pembacaan ulang pada titik ikat (*base station*) dalam satu kali *looping*, sehingga nilai penyimpangannya dapat diketahui. Besarnya koreksi apungan dirumuskan sebagai berikut :

$$D_n = \frac{g_{akhir} - g_0}{t_{akhir} - t_0} (t_n - t_0) \quad (2.3)$$

Keterangan :

- $D_n$  = Koreksi apungan di titik n
- $g_{akhir}$  = pembacaan harga gravitasi di titik akhir
- $g_0$  = pembacaan harga gravitasi di titik awal
- $t_{akhir}$  = waktu pembacaan di titik akhir
- $t_0$  = waktu pembacaan di titik awal
- $t_n$  = waktu pembacaan di titik n

### 2.3.2.3 Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Koreksi Lintang merupakan koreksi yang digunakan untuk mengoreksi nilai gayaberat yang disebabkan bentuk bumi *elipsoid*. Koreksi ini akan memperoleh medan gayaberat. Medan anomali tersebut merupakan selisih dari medan gayaberat

observasi dengan medan gayaberat teoritis. Koreksi ini menggunakan rumusan medan gayaberat teoritis pada *sferoid* referensi ( $z = 0$ ) dan ditetapkan oleh *The International of Geodesy* (IAG) dengan nama GRS (*Geodetic Reference System*) 1989 sebagai fungsi lintang yaitu :

$$g(\varphi) = 978032.7(1 + 0.0053024\sin^2\varphi - 0.0000058\sin^2\varphi) \quad (2.4)$$

Keterangan :

$g(\varphi)$  = gayaberat normal pada lintang  $\varphi$  (mGal)

$\varphi$  = sudut lintang

### 2.3.2.4 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas dilakukan untuk mereduksi pengaruh elevasi dan kedalaman titik pengukuran disebabkan oleh pengaruh variasi ketinggian terhadap medan gravitasi bumi. Koreksi udara bebas tidak memperhitungkan massa batuan diantara *mean sea level* terhadap titik pengukuran dengan persamaan :

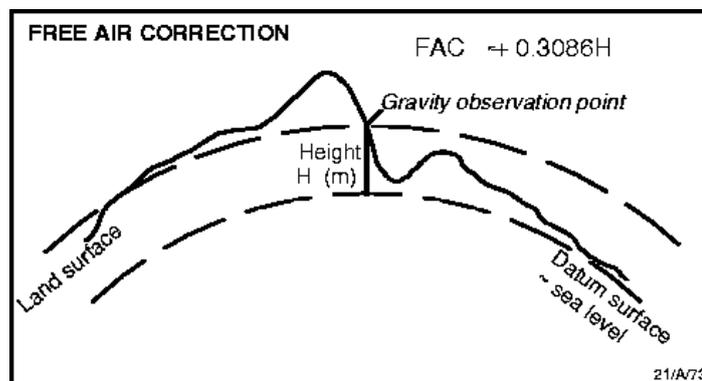
$$FAC = 0.3086 * h \quad (2.5)$$

Dimana,

$h$  = ketinggian stasiun pengukuran (m)

Setelah nilai koreksi udara bebas didapatkan, maka nilai *Free Air Anomaly* dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$FAA = g_{obs} - g(\varphi) + FAC \quad (2.6)$$



**Gambar 2.6** Koreksi udara bebas terhadap gayaberat (Zhou, X., Zhong, B., & Li, X., 1990)

### 2.3.2.5 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

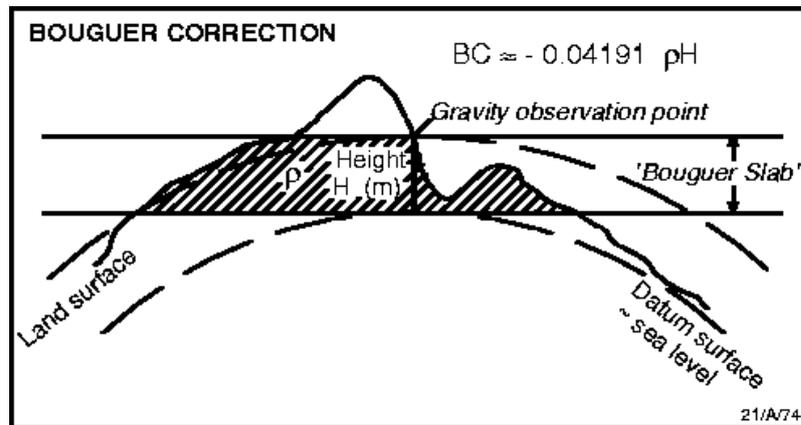
Koreksi *bouguer* dilakukan untuk memperhitungkan massa batuan yang terdapat di antara stasiun pengukuran dengan bidang datum (*geoid*) yang sebelumnya diabaikan pada koreksi udara bebas. Persamaan koreksi ini adalah :

$$BC = 0.04185\rho h \quad (2.7)$$

Keterangan :

$\rho$  = densitas batuan rata-rata

$h$  = ketinggian stasiun pengukuran (m)

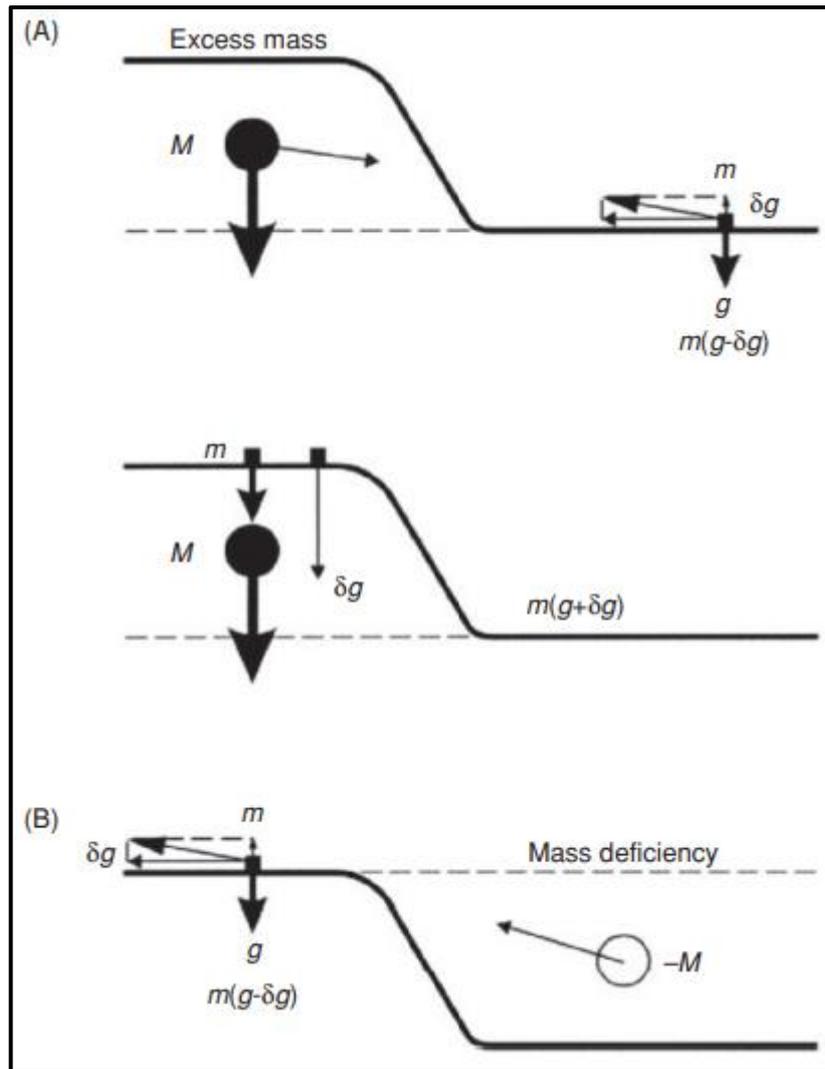


**Gambar 2.7** Koreksi bouguer terhadap data gayaberat (Zhou, X., Zhong, B., & Li, X., 1990)

### 2.3.2.6 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan dilakukan karena medan pengukuran tidak datar. Adanya bukit dan lembah disekitar titik amat akan mengurangi besarnya medan gayaberat yang sebenarnya.

Apabila stasiun benda berada di dekat gunung, maka akan terdapat gaya ke atas yang menarik pegas pada gravimeter, yang menyebabkan nilai pembacaan gravitasi berkurang. Sedangkan apabila stasiun pengukuran berada di dekat lembah, menyebabkan nilai pembacaan gravitasi bertambah. Hal ini akan mengurangi pembacaan nilai gravitasi.



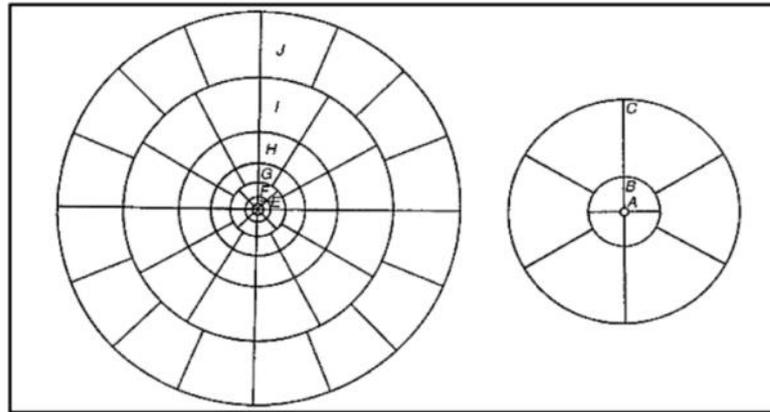
**Gambar 2.8** (A) Stasiun yang berada di dekat gunung dan (B) stasiun yang berada di dekat lembah (Reynolds, 1997)

Koreksi medan didapatkan dengan *hammer chart* (**Gambar 2.9**) sehingga diperoleh persamaan berikut (Reynolds, 1997) :

$$TC = \frac{2\pi G\rho}{n} (r_L - r_D) + \left( \sqrt{r_L^2 - z^2} \right) - \left( \sqrt{r_D^2 - z^2} \right) \quad (2.8)$$

Keterangan :

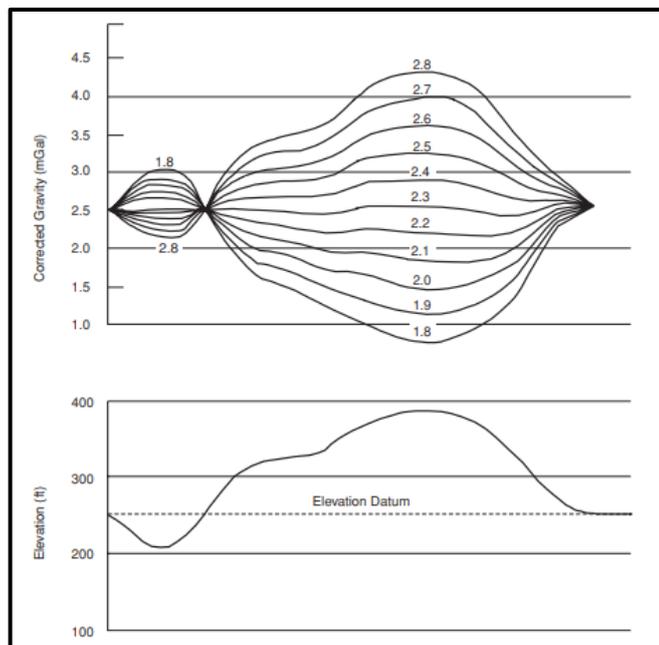
- $n$  = jumlah kompartemen dalam zona tersebut
- $\rho$  = densitas batuan rata-rata
- $z$  = elevasi rata-rata kompartemen dan titik pengukuran
- $r_L$  = radius luar
- $r_D$  = radius dalam



**Gambar 2.9** Hammer Chart (Reynolds, 1997)

### 2.3.3. Penentuan Variasi Densitas Batuan dengan Metode Nettleton

Dalam metode gravitasi rapat massa (kontras densitas) sangat penting untuk melakukan pengolahan data dan interpretasi. Metode yang sering digunakan menentukan rapat massa adalah metode Nettleton. Metode Nettleton didasarkan pada hasil pengukuran kemudian dibuat grafik anomali *bouguer* dengan berbagai macam nilai densitas yang dibandingkan dengan peta tofografi. Setelah membandingkan nilai densitas dengan peta topografi, hasil yang sesuai dianggap sebagai densitas sebenarnya.



**Gambar 2.10** Estimasi rapat massa dengan metode Nettleton (Reynolds, 1997)

### 2.3.4. Anomali Bouguer (*Complete Bouguer Anomaly*)

Anomali *Bouguer* didapatkan setelah nilai bacaan pada alat gravimeter selesai dikoreksi untuk mendapatkan nilai yang sebenarnya. Rumus anomali *bouguer* lengkap adalah sebagai berikut :

$$CBA = g_{obs} - g\varphi + FAC - BC + TC \quad (2.9)$$

atau

$$CBA = FAA - BC + TC \quad (2.10)$$

### 2.3.5. Analisis Spektrum (*Spektrum Analysis*)

Analisis spektrum menggunakan Transformasi Fourier untuk mengubah domain spasial kedalam domain bilangan gelombang atau frekuensi (Blakely, 1996). Analisis spektrum digunakan untuk mengestimasi nilai lebar jendela (*window*) serta kedalaman batas dikontinuitas dangkal dan dalam. Analisis spektrum diturunkan dari potensial gayaberat yang teramati pada suatu bidang horizontal yakni sebagai berikut :

$$F(U) = \gamma\mu F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0-z')}}{|k|}; z' > z_0; |k| \neq 0 \quad (2.11)$$

Dimana,

$U$  = potensial gayaberat

$\gamma$  = konstanta gayaberat

$\mu$  = anomali densitas

$r$  = jarak

$k$  = bilangan gelombang

$z_0$  = ketinggian titik amat

$z'$  = kedalaman benda anomali

Berdasarkan persamaan (2.11), Transformasi Fourier pada bidang horinzontal menjadi :

$$F(g_z) = \gamma\mu F\left(\frac{\delta}{\delta z} \frac{1}{r}\right) = \gamma\mu \frac{\delta}{\delta z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.12)$$

$$F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z_0 - z')}; z' > z_0 \quad (2.13)$$

Apabila distribusi rapat massa diasusikan *random*, maka tidak terjadi korelasi pada nilai gayaberat sehingga  $\mu$  bernilai 1. Transformasi Fouriernya menjadi :

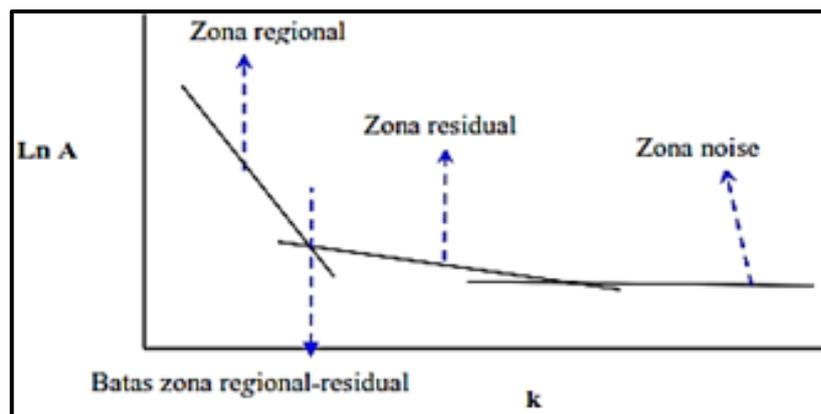
$$A = C e^{|k|} (z_0 - z') \quad (2.14)$$

Keterangan :

- $A$  = Amplitudo Gelombang
- $C$  = Konstanta
- $k$  = Bilangan Gelombang
- $(z_0 - z')$  = kedalaman

Hasil dari Transformasi Fourier lalu dialgortmakan sehingga menghasilkan kurva  $\ln A$  terhadap  $k$  seperti (**Gambar 2.11**).

$$\ln A = (z_0 - z')|k| \quad (2.15)$$



**Gambar 2.11** Ilustrasi kurva  $\ln A$  terhadap bilangan gelombang ( $k$ ) analisis spektrum

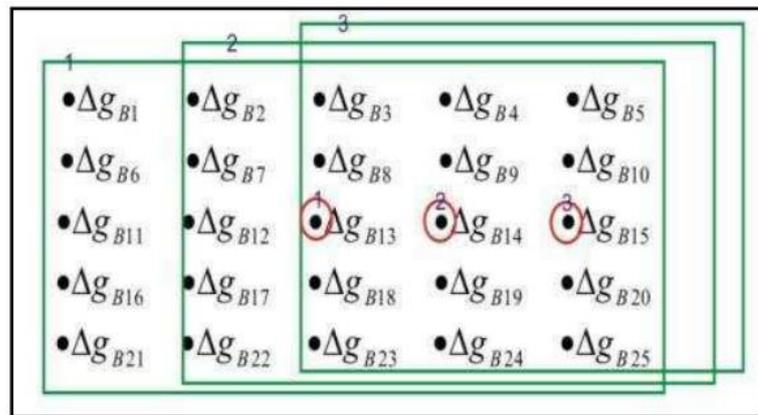
### 2.3.6. Filter *Moving Average*

*Moving Average* merupakan perata-rataan bergerak dari data anomali gayaberat yang menghasilkan anomali regional dan residual yang diperoleh dari selisih *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) dengan anomali regional. Pemisahan perata-rataan bergerak ini merupakan salah satu metode penapisan *Lowpass Filter*, dimana metode ini menghilangkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Data *Complete Bouguer Anomaly* ditapis menggunakan metode ini dengan lebar jendela merupakan rata-rata dari setiap lintasan yang telah melalui analisis spektrum.

Semakin lebar jendela yang digunakan maka nilai anomali residual akan mendekati nilai anomali bouguer (Setiadi, I., Setyana, B., Widijono, B. S., 2010).

Penerapan metode perata-rataan bergerak dapat diilustrasikan seperti **Gambar 2.11**. Nilai  $\Delta g$ , pada suatu titik dapat dihitung dengan merata-ratakan semua nilai pada sebuah kotak persegi dengan titik pusat adalah titik yang akan dihitung harga  $\Delta g_{reg}$  (Robinson, 1988). Secara matematis penerapan metode perata-rataan bergerak dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{25} [(\Delta g_1) + (\Delta g_2) + \dots + (\Delta g_{25})] \quad (2.16)$$



**Gambar 2.12** Ilustrasi *moving average* (Robinson, 1988)

### 2.3.7. Tilt Derivative (TDR)

*Tilt Derivative* (TDR) merupakan suatu metode yang digunakan untuk mempertegas batas anomali gravitasi. Pada kasus ini berguna untuk mengidentifikasi struktur sesar maupun batas struktur geologi lainnya yang berada didaerah penelitian. Metode ini menggunakan *Vertical Derivative* (VDR) dan *Total Horizontal Derivative* (THDR) yang diaplikasikan pada data CBA serta memiliki satuan radian.

*Vertical Derivative* (VDR) berfungsi untuk mempertajam kontras anomali yang dangkal. VDR ini digunakan untuk menentukan anomali frekuensi tinggi yang lebih jelas dimana hal ini ditunjukkan dengan amplitudo yang luas atau frekuensi tinggi

yang lebih jelas dimana hal ini ditunjukkan dengan amplitudo yang luas atau frekuensi anomali yang rendah.

$$VDR = \frac{\partial g}{\partial z} \quad (2.17)$$

*Total Horizontal Derivative* (THDR) adalah filter yang efektif untuk menggambarkan anomali secara lateral. Metode ini menghasilkan anomali yang tinggi dan mencerminkan lokasi dari sumber anomali.

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (2.18)$$

*Tilt Derivative* (TDR) dirumuskan sebagai *arctangent* perbandingan VDR dan THDR dengan rentang  $-\frac{\pi}{2}$  hingga  $\frac{\pi}{2}$  dimana  $\partial g$  merupakan Anomali Gayaberat (mGal),  $\partial x$  merupakan komponen horizontal terhadap sumbu x,  $\partial y$  merupakan komponen dalam sumbu y, dan  $\partial z$  merupakan komponen vertikal.

$$TDR = \tan^{-1} \frac{VDR}{THDR} \quad (2.19)$$

### 2.3.8. Pemodelan Ke Depan (*Forward Modelling*)

Pemodelan Ke Depan merupakan hasil perkiraan densitas bawah permukaan dengan membuat model geologi bawah permukaan. Pembuatan model geologi dilakukan dengan mengkorelasikan respon pengamatan dan kalkulasi sehingga menghasilkan respon yang sesuai yang diharapkan dapat menggambarkan keberadaan geologi yang sebenarnya. Prinsip umum pemodelan ini adalah meminimalkan perbedaan antara anomali yang diamati untuk mengurangi ambiguitas.

Menurut Talwani (1959), pemodelan metode ke depan untuk efek gravitasi benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n yang dinyatakan sebagai integrasi garis sepanjang sisi-sisi poligon :

$$g_z = 2G\rho\phi \int z d\theta \quad (2.20)$$

Integral garis dapat pula dinyatakan sebagai jumlah garis tiap sisinya, sehingga persamaannya ditulis sebagai berikut :

$$g_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n = Z_i \quad (2.21)$$

Dengan  $Z_i$  diberikan oleh persamaan berikut :

$$Z_i = a_1 \sin\phi_1 \cos\phi_1 \left[ (\theta_i + \theta_{i+1}) + \tan\phi_i \cdot \ln \left\{ \frac{\cos\theta_i - \tan\phi_i}{\cos\theta_{i+1} (\tan\theta_{i+1} - \tan\phi_i)} \right\} \right] \quad (2.22)$$

### 2.3.9. Sistem Panas bumi (*Geothermal System*)

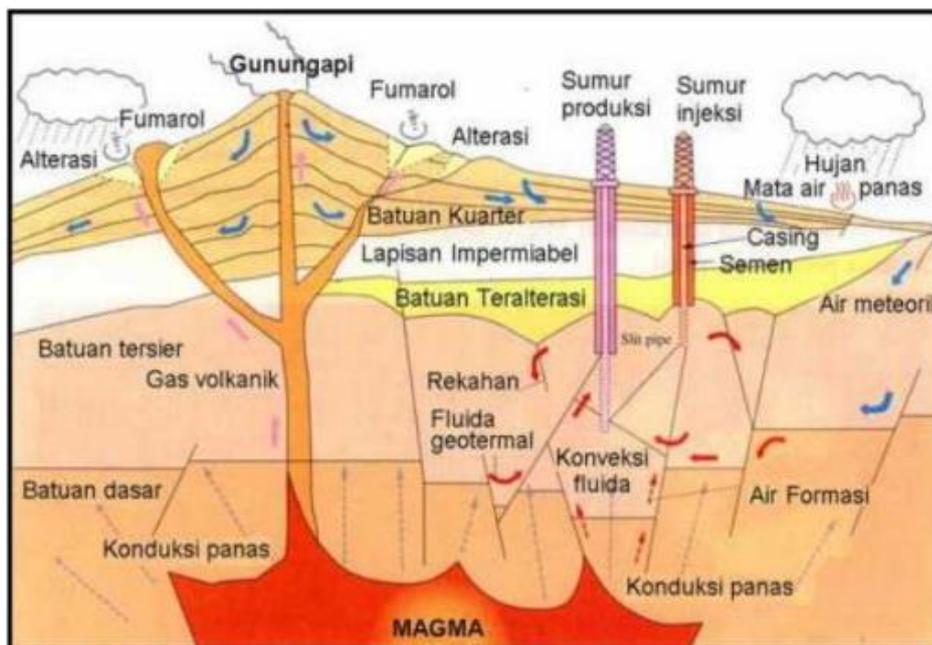
Sistem panas bumi merupakan sistem yang berbeda dengan sistem minyak dan gas (minyak bumi) dimana cairan disimpan dalam pori-pori formasi permeabel dan dibatasi oleh batuan kedap air. Sistem panas bumi juga berbeda dengan sistem air tanah, yang berupa akuifer. Sistem panas bumi adalah sistem teknologi yang memanfaatkan energi panas bumi. Sistem panas bumi terdiri dari tiga komponen penting yaitu : sumber panas, reservoir dan batuan penudung.

Sumber panas merupakan suatu sumber panas dari dalam perut bumi yang kemudian panas tersebut ditransfer ke permukaan bumi, sumber panas ini dapat berasal dari dapur magma, tubuh intrusi atau panas akibat dari proses pembebanan. Reservoir merupakan tempat penyimpanan fluida panas yang memiliki porositas dan permeabilitas baik untuk mengalirkan fluida panas. Sedangkan batuan penutup merupakan batuan penutup yang berada diatas reservoir. Batuan ini memiliki permeabilitas yang buruk dan konduktifitas panas kecil sehingga entalphi pada fluida panas dalam resevoir tetap terjaga.

Sistem panas bumi terbentuk dari adanya perpindahan panas yang terbagi menjadi dua yaitu : perpindahan panas secara konduksi merupakan perpindahan panas melalui suatu bahan akibat adanya hubungan antar molekul dan perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang diikuti dengan perpindahan masa. Perpindahan secara konveksi berhubungan dengan gaya apung (*bouyancy*) dimana fluida yang bergerak ke bawah akan kontak dengan sumber panas yang sehingga fluida memiliki *temperature* yang panas membuat fluida menjadi ringan, dan apabila temperatur fluida terus naik akan mengakibatkan penambahan volume dan tekanan yang menekan batuan disekitarnya untuk mencari celah dan melepaskan tekanan. Hal ini dikarenakan tekanan dipermukaan lebih rendah dibandingkan dengan tekanan dibawah permukaan. Apabila fluida dengan

temperatur panas bergerak ke atas dan fluida dengan temperatur dingin bergerak turun akan terjadi sirkulasi fluida yang biasa disebut arus konveksi.

Dalam sistem panas bumi terdapat zona *upflow* yang menurut Syabi dkk (2017) zona *upflow* merupakan zona potensi panas bumi yang memiliki permeabilitas serta gradien suhu bawah permukaan yang lebih tinggi dibandingkan zona *outflow*, dimana zona *outflow* menurut Nicholson (1993) merupakan zona tempat terjadinya lateral *flow* fluida panas bumi.

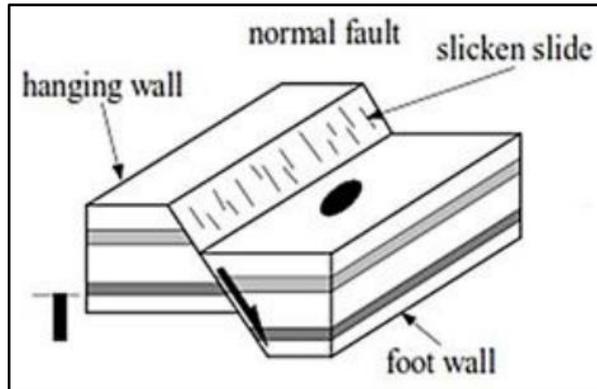


**Gambar 2.13** Sistem panas bumi daerah vulkanik

### 2.3.10. Patahan

#### 2.3.11.1 Normal Fault

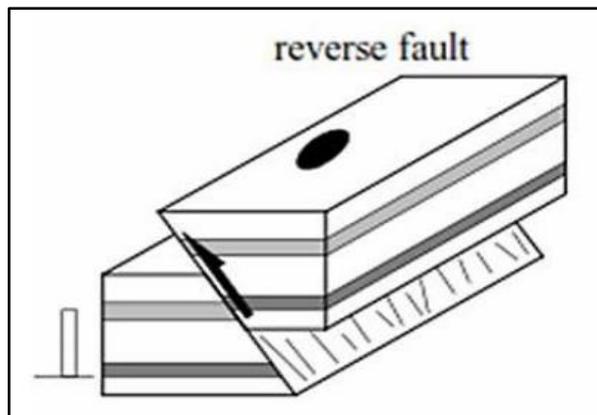
*Normal Fault* merupakan patahan yang terjadi pada batuan dimana arah gerak blok bergerak ke bawah dari keadaan asalnya seperti pada **Gambar 2. 14**.



**Gambar 2.14** *Normal Fault*

**2.3.11.2 Reverse Fault**

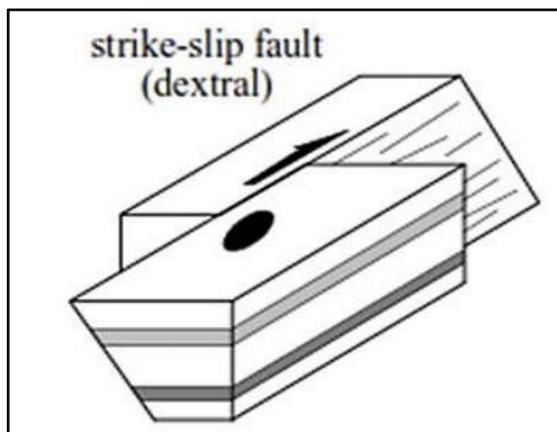
*Reverse Fault* merupakan patahan yang arah gerak blok bergerak ke atas dari keadaan asalnya seperti pada **Gambar 2. 15**.



**Gambar 2.15** *Reverse Fault*

**2.3.11.3 Strike-slip Fault**

*Strike-slip Fault* merupakan patahan yang arah gerak blok batuanmnya mendatar sepanjang bidang patahan seperti pada **Gambar 2. 15**.

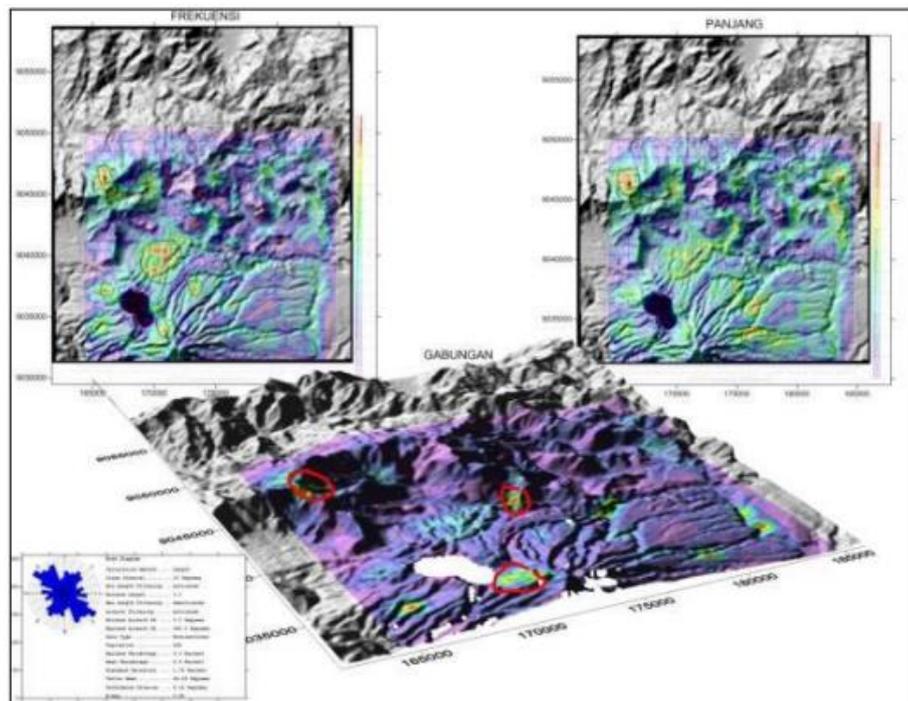


**Gambar 2.16** *Strike-slip Fault*

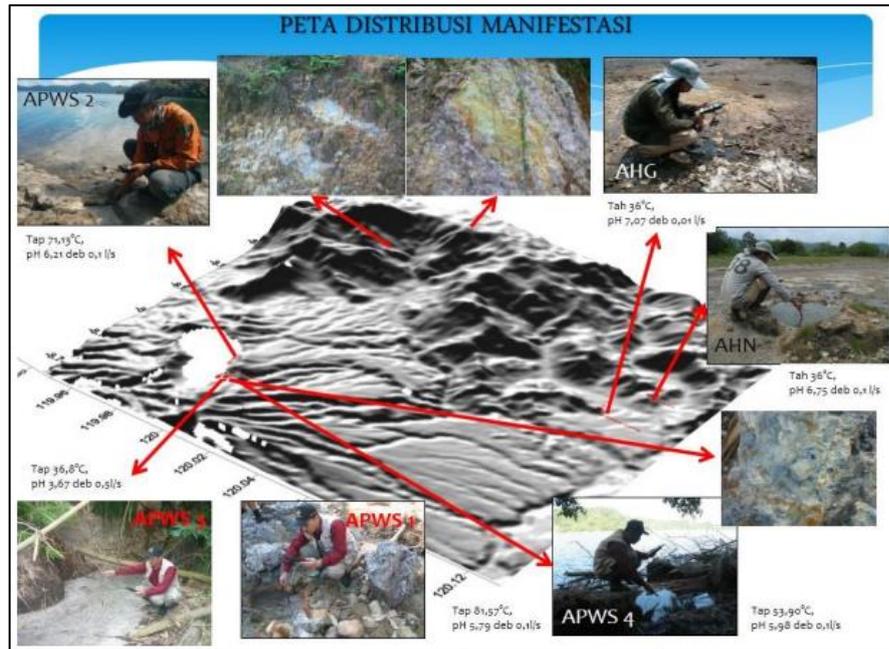
## 2.4 Penelitian yang Sudah Pernah Dilakukan

### 2.4.1 Survei Geologi dan Geokimia Panas Bumi Daerah Waesano, Kabupaten Manggarai Barat Provinsi Nusa Tenggara Timur

Survei ini dilakukan oleh Kelompok Penyelidikan Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Geologi pada tahun 2015. Menurut penelitian, daerah Wae Sano memiliki tantangan tersendiri. Posisinya yang berada pada jalur vulkanik merupakan areal ideal dengan didukung data umur batuan yang masih relatif muda. Aktivitas tersebut membawa panas yang baik dalam sistem panas bumi Wae Sano. Temperatur air yang tinggi dan munculnya alterasi luas di sekitar Danau Sano Nggoang menunjukkan terbentuknya proses hidrothermal. Data struktur rekahan yang menunjukkan daerah permeabel dan berpotensi sebagai reservoir mendukung keterdapatan areal prospek yang diduga berada di sekitar bagian tenggara Danau Sano Nggoang.



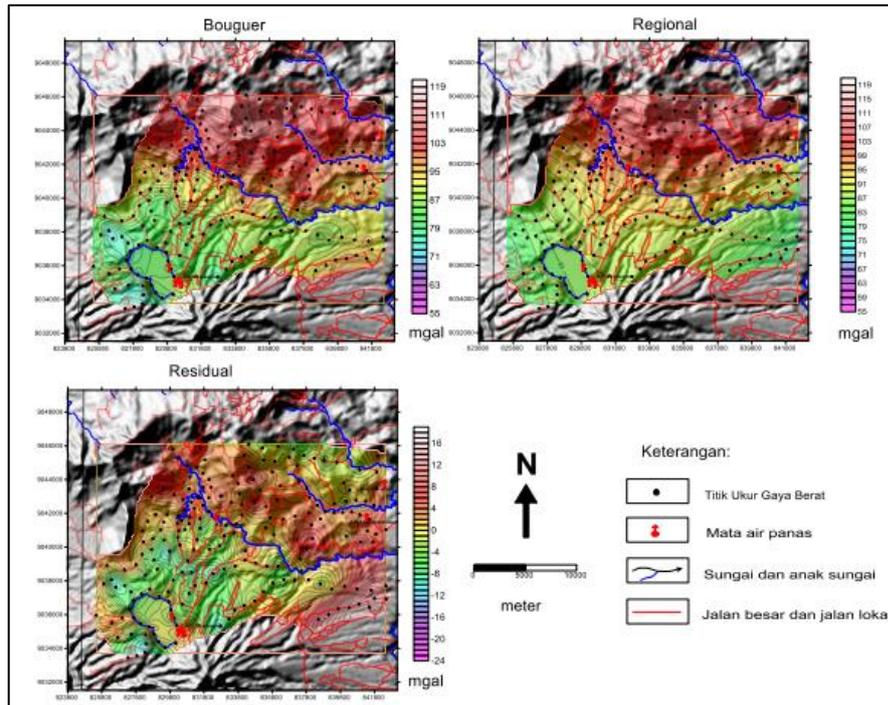
**Gambar 2.17** Analisis Densitas Rekahan di Daerah Wae Sano



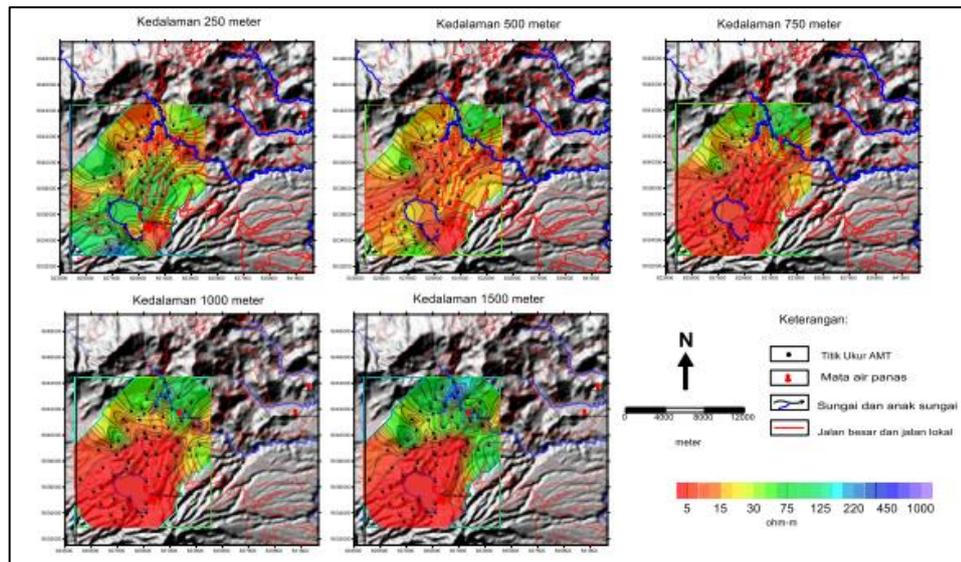
**Gambar 2.18** Peta Distribusi Manifestasi di Daerah Wae Sano

#### **2.4.2 Survei Terpadu Gayaberat dan *Audio Magnetoteluric* (AMT) Daerah Panas Bumi Waesano, Kabupaten Manggarai Barat Provinsi Nusa Tenggara Timur**

Survei ini dilakukan oleh Muhammad Kholid, Iqbal Takodama dan Nizar Muhammad Nurdin pada tahun 2015. Survei gayaberat digunakan untuk menentukan variasi densitas daerah survei dan untuk menganalisis serta mengetahui adanya struktur, sedangkan survei *audio magnetoteluric* digunakan untuk mengetahui lapisan tahanan jenis bawah permukaan daerah penelitian.



**Gambar 2.19** Peta anomali *bouguer*, anomali regional dan anomali residual survei gayaberat



**Gambar 2.20** Peta Tahanan Jenis per Kedalaman survei *audio magnetoteluric*