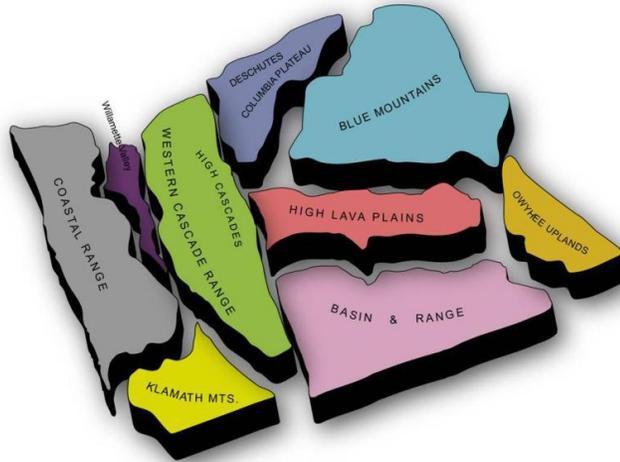


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Geologi Regional

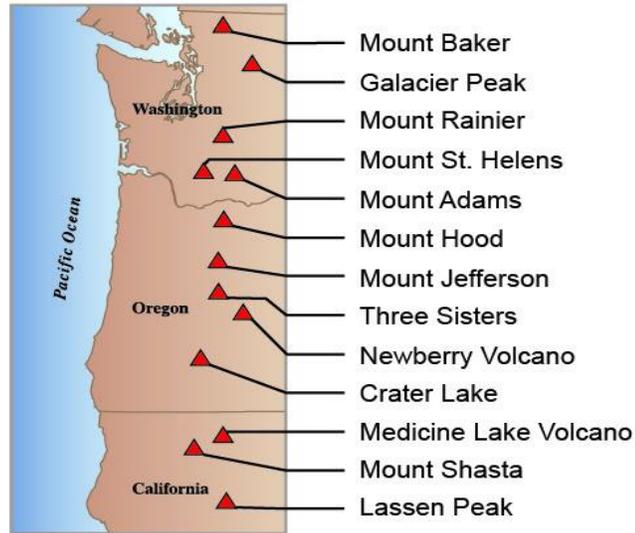
Oregon adalah salah satu negara bagian Amerika Serikat yang terletak di *Pacific Northwest* wilayah Amerika Selatan. Secara geografis terletak pada lintang 42° N - 46°18' N dan bujur 116° 28'W- 124°38' dengan luas total area mencapai 255,026 km². Secara umum, Oregon dibagi menjadi 9 formasi fisiografi batuan yaitu *Blue Mountains*, Pegunungan Klamath, *Basin and Range*, Dataran Tinggi Lava, Dataran Tinggi Descgutes-Columbia, Pegunungan Cascade, Dataran Tinggi Owyhee dan Barisan Pegunungan Coast.



Gambar 2. 1 Fisiografi Oregon (Sifford, 2014)

Daerah ini merupakan zona subduksi dimana lempeng samudera Pasifik menunjam ke arah lempeng benua Amerika. Karena faktor geologi tersebut menyebabkan pada daerah Oregon terdapat serangkaian gunung api yang menyimpan potensi panas bumi yang cukup besar (Sifford, 2014). Rangkaian pegunungan Cascade telah mengalami erupsi selama lebih dari 500,000 tahun yang lalu dan selama 4.000 tahun terakhir

terjadi erupsi dengan rata-rata 2 erupsi per abadnya. Erupsi yang terakhir terjadi pada Gunung St. Helens di Washington pada tahun 1980. Aliran panas yang berasal dari magma pada kedalaman lebih dari 10 km / 6 mil yang terkonsentrasi disepanjang rangkaian pegunungan Cascade (Blackwell, dkk, 1990).



Gambar 2. 2 Rangkaian Pegunungan Cascade (Sifford, 2014)

2.2 Geologi Daerah Penelitian

Salah satu wilayah di Oregon yang mempunyai potensi panas bumi adalah Glass Buttes. Glass Buttes adalah sebuah wilayah dataran tinggi lava yang terletak di timur laut Lake County, Oregon. Pada daerah tersebut terdapat endapan merkuri dan alterasi hidotermal dari batuan asal (*wall rock*) yang memunculkan mineral-mineral lempung. Selain itu, hasil pengeboran sumur yang telah dilakukan pada daerah tersebut juga mengindikasikan terdapat fluida bersuhu tinggi yang telah bermigrasi pada sistem di daerah penelitian (Waish, dkk, 2015).

2.2.1 Geomorfologi

Glass Buttes adalah wilayah yang didominasi oleh batuan Miosen Akhir hingga batuan vulkanik Pleistosen terutama terjadinya vulkanisme riolitik pada daerah sekitar Gunung Api Newberry. Struktur geologi yang paling menonjol pada

daerah ini adalah zona patahan Brothers yang memiliki arah barat hingga barat laut dengan jenis sesarnya termasuk kedalam jenis sesar normal. Zona tersebut mengandung formasi patahan dari vulkanik silikat yang masih termasuk kedalam wilayah dataran tinggi lava (Walker, dkk, 1969). Adapun terdapat 4 jenis batuan pada daerah Glass Buttes menurut Ciancanelli dan Emmet tahun 1979 berdasarkan perbedaan periode vulkanismenya (Ciancanelli & Emmet, 1979) yaitu :

– Batuan Vulkanik Pre-Glass Buttes

Kelompok batuan ini merupakan kelompok batuan beku tertua pada daerah ini yang terekspos hingga ke permukaan. Diperkirakan batuan ini terbentuk pada zaman pliosen awal namun tidak menutup kemungkinan bisa lebih tua dibandingkan yang diperkirakan. Batuan pada kelompok ini hampir seluruhnya mengandung mineral olivine aliran basalt yang meliputi seluruh area sekitar Glass buttes. Terdapat juga unit dari batuan *welded-tuff* yang memiliki pecahan-pecahan *glass* dan telah mengalami deformasi yang diduga berkorelasi dengan Devine Canyon dan Pegunungan Wagontire (Greene, 1973).

– Batuan Vulkanik Silikat Glass Buttes

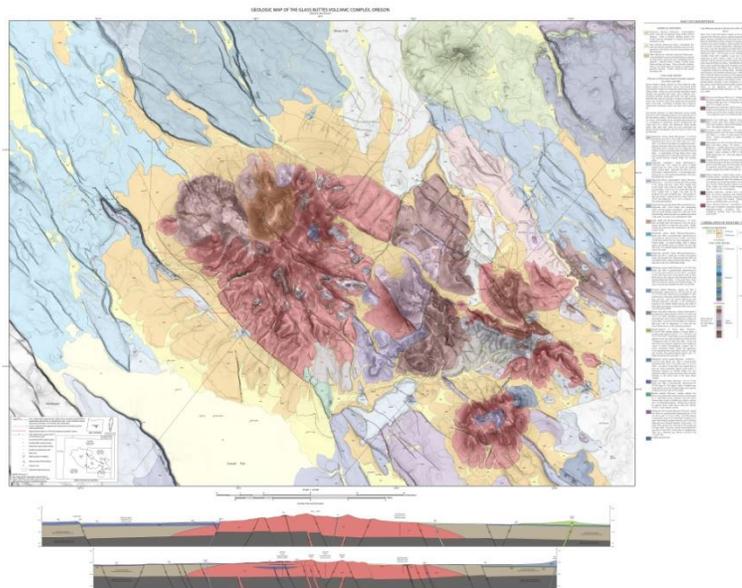
Batuan pada daerah Glass Buttes didominasi oleh batuan silikat yang diantaranya terdiri dari batuan riolit, aliran riodacit, dan batuan tuff. Rangkaian kubah silikat pada vulkanisme silikat di area Glass Buttes mempunyai pola memanjang dari arah barat hingga barat laut. Umumnya area Glass Buttes dapat dipetakan sebagai unit yang tersusun atas aliran riolit menjadi singkapan dari *flow-banded* atau riolit *pumice* dan diatas permukaan menjadi batuan batuan obsidian yang berwarna coklat-kemerahan. Vulkanisme silikat pada daerah ini terjadi pada zaman pliosen berdasarkan umurnya sekitar 4.9 hingga 0.3 juta tahun yang lalu untuk silikat utama (Walker, dkk, 1974).

– Basalt dan Andesit Plio-Pleistosen

Kelompok batuan ini terbentuk disekitaran lingkaran cincin batuan vulkanik utama, yang memisahkannya dari aliran basalt olivin tertiary berumur lebih tua. Meskipun aliran basalt batuan Plio-Pleistosen sangat identik dengan singkapan aliran basalt tua, namun diantara keduanya memiliki perbedaan secara petrographis dan perbedaan lainnya adalah batuan basalt yang lebih muda memiliki karakteristik lebih porpiritik dibandingkan dengan batuan basalt tua. Keberadaan aliran andesit berskala besar yang diperlihatkan diarah barat laut Glass Buttes merupakan bagian kelompok batuan ini. Kelompok batuan ini juga termasuk didalamnya beberapa batuan basalt kerucut sinder atau dekat dengan aliran basalt porpiritik muda. Kerucut tersebut mempresentasikan keberadaan *vent* pada basalt muda dan memberikan informasi mengenai sistem *ring-fracture* pada sekitar kubah silikat Glass Buttes.

– Sedimen Tertiari-Quarter

Kelompok batuan ini ditandai oleh adanya batuan alluvium di area yang cukup luas pada daerah ini. Batuan alluvium tersebut terdiri dari guguran material vulkanik berukuran batuan besar hingga berukuran tanah liat.



Gambar 2. 3 Geologi Regional Glass Buttes, Oregon (Waish, dkk, 2015)

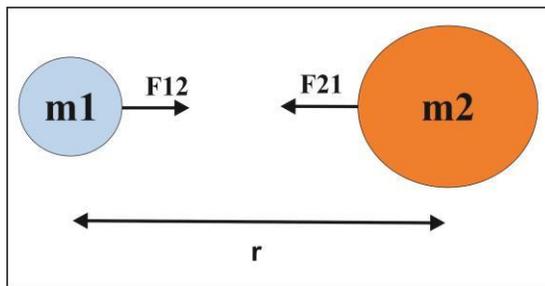
2.3 Teori Mengenai Metode

2.3.1 Teori Umum Mengenai Metode

Metode gaya berat didasarkan pada pengukuran variasi medan gaya berat bumi yang disebabkan adanya variasi densitas di bawah permukaan bumi. Dengan adanya penyimpangan nilai medan gaya berat, menandakan adanya perbedaan densitas suatu material terhadap lingkungan di sekitarnya. Konsep dasar metode ini ialah Hukum gravitasi Newton yang menyatakan bahwa gaya tarik-menarik antara dua buah benda sebanding dengan massa kedua benda tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara ke dua pusat massa benda tersebut diperlihatkan pada gambar

2.4. Besarnya gaya tarik antara dua benda bermassa m_1 dan m_2 dinyatakan oleh persamaan 2.1:

$$\vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} r^2 \quad (2.1)$$



Gambar 2. 4 Gaya tarik menarik antara dua benda

Sedangkan Hukum Newton II tentang gerak menyatakan bahwa gaya (F) adalah besarnya hasil perkalian antara massa suatu benda (m_1) dengan percepatan (α) benda tersebut. Hukum Newton II dinyatakan oleh persamaan berikut :

$$F = m_1 \alpha \quad (2.2)$$

Bila percepatan berarah vertikal maka percepatan yang berlaku adalah percepatan gravitasi (g). Sehingga persamaan (2.2) menjadi sebagai berikut:

$$F = m_1 g \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk mendapatkan percepatan gravitasi yang dialami suatu benda bermassa (m_1) yang disebabkan adanya massa bumi (m_2) pada jarak tertentu, didapatkan dengan mensubstitusikan persamaan (2.3) ke persamaan (2.1) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$g = \gamma \frac{m_2}{r^2} r_1 \quad (2.4)$$

Keterangan :

F = Gaya antara dua buah benda pada m_1 dan m_2 (Newton atau kg.m/s^2)

γ = Konstanta gravitasi ($6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

m_1 = Massa benda (kg)

m_2 = Massa benda (kg)

r_1 = Vektor satuan berarah m_1 ke m_2

r = Jarak antara massa 1 dan 2 (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

2.3.2 Teori Khusus Mengenai Pengolahan dan Pemodelan Data

2.3.2.1 Koreksi Daya Gaya berat

Pengukuran gaya berat suatu titik dipermukaan bumi yang diukur dengan alat gravitimeter dipengaruhi oleh beberapa faktor sehingga perlu dilakukan koreksi.

Koreksi yang dilakukan adalah sebagai berikut :

a) Koreksi Lintang (Spheroid referensi dan Geoid)

Koreksi ini dilakukan karena adanya perbedaan nilai percepatan gravitasi dipermukaan bumi yang disebabkan bentuk bumi yang *spheroid*, menggebu pada bagian ekuator dan datar di bagian kedua kutub. Hal ini merupakan hasil dari rotasi bumi yang menyebabkan bentuk bumi tidak bulat sempurna. Nilai percepatan gravitasi ini bervariasi dari ekuator ke kutub atau bervariasi terhadap lintang. Oleh karena itu dilakukan koreksi

lintang dengan persamaan dari *International Association of Geodesy (IAG)* yang diberi nama *Geodetic Reference System 1980 (GRS80)* yaitu:

$$g_{\phi} = 978032,7 (1 + 0.0053024 \sin^2 \phi - 0,0000058 \sin^2 2\phi) \quad (2.5)$$

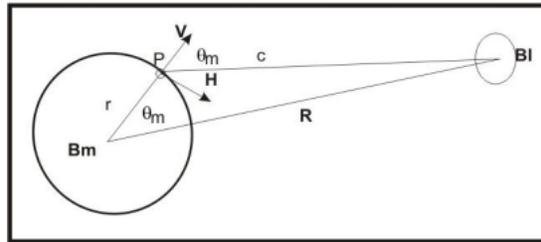
Keterangan :

ϕ = Sudut lintang (radians)

g_{ϕ} = Gayaberat normal pada lintang ϕ (mGal)

b) Koreksi Pasang Surut (Tide Correction)

Medan gayaberat di suatu titik pada permukaan bumi dipengaruhi juga oleh benda-benda diluar angkasa seperti bulan dan matahari. tergantung pada rotasi bumi. Sehingga perlu dilakukan koreksi pasang surut yang ilustrasinya ditunjukkan oleh gambar 2.2 (Longman, 1959).



Gambar 2. 5 Ilustrasi pengaruh gaya berat karena benda diluar bumi

$$U_P = G(r) \left(\left(\frac{c}{R} \right)^3 \left(\cos 2\theta_m + \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{6} \frac{r}{c} \left(\frac{c}{R} \right)^4 \right) \quad (2.6)$$

Keterangan :

U_P = Potensial di titik p

θ_m = Posisi lintang

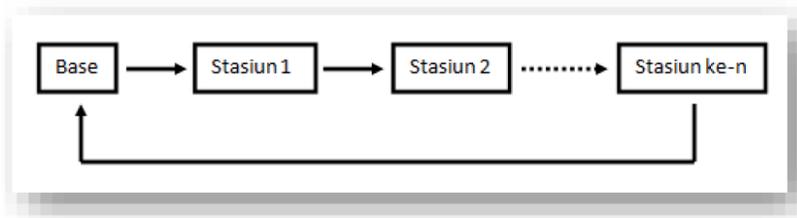
c = Jarak rata-rata ke benda diluar bumi (Km)

r = Jari-jari bumi ke titik p (Km)

R = Jarak dari pusat bumi ke benda diluar bumi (Km)

c) Koreksi Apungan (Drift Correction)

Koreksi *drift*/apungan dilakukan karena adanya perbedaan pembacaan gaya berat di stasiun yang sama pada waktu yang berbeda, yang diakibatkan oleh adanya guncangan pegas pada alat gravimeter selama proses transportasi dari stasiun satu ke stasiun lainnya selama proses pengukuran. Untuk mengetahui besar penyimpangan tersebut, maka akuisisi data dibuat dalam suatu rangkaian tertutup dengan mengasumsikan penyimpangan linier pada selang waktu tertentu yang diperlihatkan pada gambar 2.3..



Gambar 2. 6 Sketsa pengambilan data gaya berat dengan loop tertutup

$$Drift = \frac{g_{Nakhir} - g_{Nawal}}{t_{akhir} - t_{awal}} (t_{stasiun} - t_{awal}) \quad (2.7)$$

Keterangan :

$Drift$ = Koreksi *drift* (mGal)

g_N = gread + tidal (mGal)

g_{Nakhir} = Harga g_N pada pengukuran stasiun terakhir (mGal)

g_{Nawal} = Harga g_N pada pengukuran stasiun awal dalam satu *loop* (mGal)

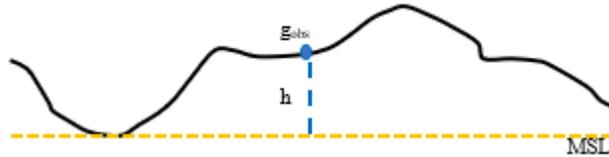
t_{awal} = Waktu pengukuran stasiun awal dalam satu *loop* (sekon)

t_{akhir} = Waktu pengukuran stasiun akhir dalam satu *loop* (sekon)

$t_{stasiun}$ = Waktu pengukuran stasiun ke-n dengan $n = 1,2,3 \dots$ dst (sekon)

d) Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas (*Free Air Correction*) adalah koreksi yang dilakukan akibat pengaruh ketinggian yang disebabkan oleh jarak stasiun terhadap *spheroid* referensi yang ditunjukkan oleh gambar 2.8.



Gambar 2. 7 Koreksi udara bebas

$$FAC = 0,3086h \quad (2.8)$$

$$FAA = g_{obs} - g_{\phi} + FAC \quad (2.9)$$

Keterangan :

FAA = *Free air anomaly* (mGal)

g_{obs} = Nilai gayaberat observasi (mGal)

g_{ϕ} = Gayaberat pada lintang ϕ (mGal)

FAC = *Free air correction* (mGal)

e) Koreksi Topografi (*Terrain Correction*)

Koreksi *terrain* akan menghilangkan pengaruh topografi permukaan yang cenderung berundulasi atau kasar dengan perbedaan elevasi yang besar, seperti adanya bukit atau lembah di sekitar titik pengukuran. Perhitungan koreksi topografi dapat dilakukan menggunakan *Hammer Chart* yang dikembangkan oleh Sigmund Hammer. seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini (**Gambar 2.9**). Koreksi medan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10 dibawah ini :

$$TC = G\rho\theta \left\{ (r_L - r_D) + \left(\sqrt{r_L^2 - Z^2} \right) - \left(\sqrt{r_D^2 - Z^2} \right) \right\} \quad (2.10)$$

Keterangan :

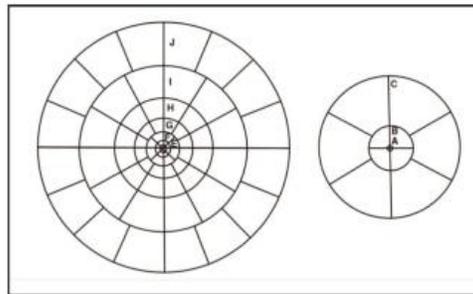
G = Besar nilai gravitasi (mGal)

ρ = Densitas batuan rata-rata (gr/cc)

θ = Sudut (radian)

Z = Perbedaan elevasi rata-rata (m)

r_L, r_D = Radius luar dan radius dalam (m)



Gambar 2. 8 *Hammer Chart* (Reynolds, 2011)

f) Koreksi Bouguer (Bouguer Correction)

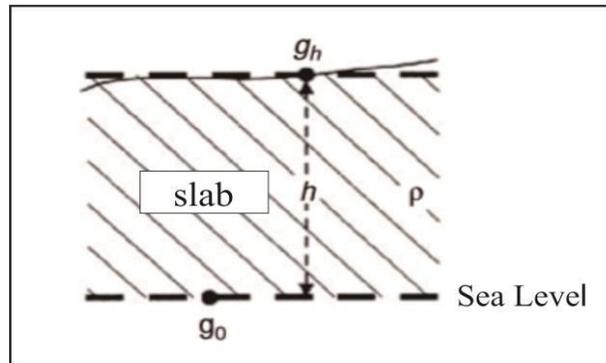
Koreksi Bouguer ini dilakukan untuk memperhitungkan efek tarikan massa yang berada di antara stasiun pengukuran dan bidang datum, hal ini diabaikan pada koreksi udara bebas seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.10. menggunakan persamaan seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2.11:

$$BC = 0,04192 h\rho \quad (2.11)$$

Keterangan :

h = Perbedaan ketinggian (m)

ρ = Densitas rata-rata batuan (gr/cc)



Gambar 2. 9 Koreksi Bouguer (W. M. Telford, 1990)

Sedangkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) didapatkan dengan persamaan sebagai berikut

$$CBA = G_{obs} - G_{teoritis} \quad (2.12)$$

$$CBA = G_{obs} - (g_{\varphi} - FAC + BC - TC) \quad (2.13)$$

Keterangan :

g_{φ} = Nilai gayaberat pada lintang radian (mGal)

FAC = *Free air correction* (mGal)

BC = Koreksi *Bouguer* (mGal)

TC = Koreksi *Terrain* (mGal)

2.3.2.2 Estimasi Densitas Bawah Permukaan Rata-Rata

Nilai percepatan gravitasi yang terukur di permukaan bumi berbeda-beda pada setiap daerah. Bergantung dari litologi, struktur geologi dan batuan penyusun yang ada dibawah permukaan. Sehingga sangat penting untuk mengestimasi densitas rata-rata di daerah penelitian.

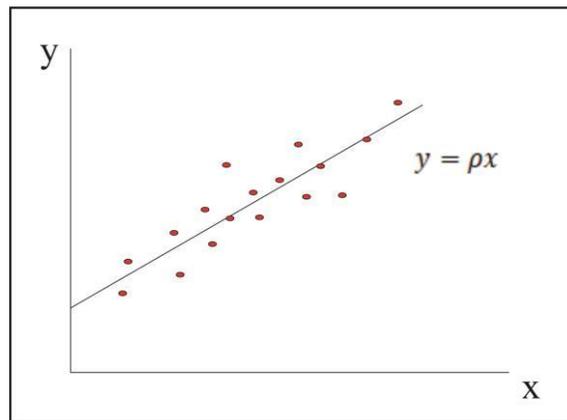
Metode parsnis didasarkan pada persamaan anomali bouguer dengan asumsi nilai anomali bouguer sama dengan nol. Sehingga nilai densitas rata-rata didapatkan dari gradien persamaan garis linier hasil plot antara koreksi bouguer

dikurangi koreksi *terrain* $(0.01419h - \frac{TC}{\rho})$ sebagai sumbu X terhadap nilai Free Air Anomaly (FAA) sebagai sumbu Y seperti yang dijelaskan pada gambar 2.11 :

$$g_{observasi} - g\phi + FAC = BC - TC \quad (2.14)$$

$$g_{observasi} - g\phi + FAC = (0.01419h - \frac{TC}{\rho})\rho \quad (2.15)$$

$$FAA = (0.01419h - \frac{TC}{\rho})\rho \quad (2.16)$$



Gambar 2. 10 Persamaan garis linier metode paransis

2.3.2.3 Analisis Spektral

Analisis spektral dilakukan dalam pengolahan data gayaberat untuk mengestimasi atau memperkirakan lebar jendela (*window*) dan kedalaman anomali gaya berat yang terukur pada data. Analisis spektral ini menggunakan transformasi Fourier untuk mengubah fungsi dalam spasial menjadi fungsi dalam bilangan gelombang. Menggunakan persamaan Blakely,1995 pada suatu bidang horizontal seperti sebagai berikut :

$$F(U) = \gamma\mu F \frac{1}{r} \quad (2.17)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0 - z')}}{|k|} \quad (2.18)$$

Keterangan :

U = Potensial gayaberat (Joule)

γ = Konstanta gayaberat (Nm^2/kg^2)

μ = Anomali rapat massa (gr/cc)

r = Jarak (m)

k = Bilangan gelombang (rad/m)

Sehingga persamaan diatas menjadi :

$$F(U) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0-z')}}{|k|} \quad (2.19)$$

$$F(g_z) = \gamma\mu F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) = 2\pi e^{|k|(z_0-z')} \quad (2.20)$$

Keterangan :

g_z = Anomali gayaberat (mGal)

z_0 = Ketinggian (m)

k = Bilangan gelombang (rad/m)

z = Kedalaman anomali (m)

Jika distribusi rapat massa bersifat acak dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gayaberat maka nilai anomali rapat masa dianggap satu. Sehingga transformasi Fourier anomali gaya berat menjadi persamaan 2.21 :

$$A = C e^{|k|(z_0-z')} \quad (2.21)$$

Keterangan :

A = Amplitudo (m)

C = Konstanta

Estimasi lebar jendela diperlukan dalam proses pemisahan anomali regional dan residual. Untuk mendapatkan lebar jendela spektral amplitudo, hasil transformasi Fourier dilogaritmakan sehingga menghasilkan grafik antara dengan yang linier dimana komponen k menjadi berbanding lurus dengan spektral amplitudo.

$$\ln A = |k|(z_0 - z') + \ln C \quad (2.22)$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan sebagai persamaan garis lurus, dimana $\ln A$ sebagai sumbu y, $|k|$ sebagai sumbu x dan $(z_0 - z')$ sebagai kemiringan garis (gradien). Gradien ini menunjukkan rata-rata kedalaman regional dan residual pada setiap lintasan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.7. Berdasarkan batas antara anomali regional dan residual didapatkan nilai bilangan gelombang *cut off* (k_c) yang diambil sebagai penentu lebar jendela. Adapun hubungan panjang gelombang λ dengan bilangan gelombang k diperoleh dari persamaan berikut (Reynolds, 2011) :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.23)$$

atau

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (2.24)$$

Sehingga lebar jendela dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\lambda = N \cdot \Delta x \quad (2.25)$$

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (2.26)$$

Keterangan :

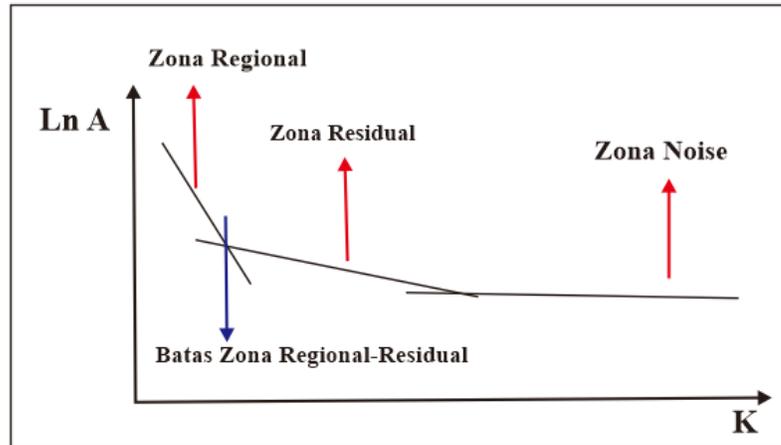
N = Lebar jendela

k = Bilangan gelombang (rad/m)

k_c = Bilangan gelombang *cut off* (rad/m)

Δx = Spasi grid (m)

λ = Panjang gelombang (m)



Gambar 2. 11 Kurva pemisahan pada analisis spektral

2.3.2.4 Pemisahan Anomali Gaya Berat Regional dan Residual

Pemisahan anomali regional dan residual yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah :

a) Gaussian filter

Gaussian filter digunakan untuk pemisahan anomali regional dan anomali residual. *Gaussian filter* termasuk kedalam jenis *low pass filter* dimana pada filter ini meloloskan sinyal yang memiliki frekuensi lebih rendah dari posisi frekuensi *cut off* dan didasarkan pada fungsi distribusi peluang *gaussian*.. Menggunakan persamaan Gonzales & Woods, 2002 pada 1 Dimensi dan 2 Dimensi sebagai berikut :

$$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.27)$$

$$f(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.28)$$

b) Second Vertical Derivative (SVD)

Second Vertical Derivative (SVD) pada prinsipnya adalah melakukan turunan 2 kali pada nilai anomali yang merupakan komponen vertikal pada data anomali gayabarat. Tujuan dari SVD adalah untuk memberikan efek dangkal dari pengaruh regional dan menentukan batas-batas struktur pada data. Metode ini termasuk kedalam jenis *high pass filter* dan dinyatakan menggunakan persamaan W.M. Telford,1990 sebagai berikut :

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (2.29)$$

Sehingga persamaan SVD diperoleh sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} \right) \quad (2.31)$$

Untuk penampang atau 1D, persamaannya menjadi :

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (2.32)$$

$$\Delta g_{svd} (\Delta x, \Delta y) \approx \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(x, y) F(x - \Delta x, y - \Delta y) dx dy \quad (2.33)$$

Terdapat beberapa operator filter SVD yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dibawah ini :

Tabel 2. 1 Berbagai operator SVD.

Henderson & Ziets (1949)				
0	0	-0,0838	0	0
0	1	-2,6667	1	0
-0,0838	-2,6667	17	-2,6667	-0,0838
0	1	-2,6667	1	0
0	0	-0,0838	0	0
Elkins (1951)				
0	-0,0833	0	-0,0833	0
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0	-0,0334	1,0668	-0,0334	0
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0	-0,0833	0	-0,0833	0
Rosenbach (1953)				
0	0,0416	0	0,0416	0
0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	0,0416
0	-0,75	4	-0,75	0
0,0416	-0,3332	-0,75	-0,3332	0,0416
0	0,0416	0	0,0416	0

2.3.2.5 Forward Modelling 2,5D

Forward modeling merupakan pemodelan yang dilakukan untuk mendapatkan data teoritik dibawah permukaan menggunakan parameter model yang telah diketahui. Pemodelan kedepan (*forward modeling*) untuk menghitung efek gaya berat model bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang yang dapat diwakili oleh suatu polygon berisi n dinyatakan sebagai integral garis sepanjang sisi-sisi poligon (Talwani,dkk, 1969). Untuk memperoleh kecocokan antara data teoritis (respon model) dengan data lapangan dapat dilakukan proses

coba-coba (*trial and error*) dengan mengubah-ubah harga parameter model (Grandis, 2009).

Menurut (Blakely, 1995) dengan memberikan potensial gravitasi dari benda dua dimensi dimana kerapatan *volumetric* $\rho(x,y)$:

$$U = 2\gamma \int \rho(s) \log \frac{1}{r} ds \quad (2.34)$$

Dimana:

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (z - z')^2} \quad (2.35)$$

Dengan tarikan vertikal gravitasi diberikan sebagai berikut :

$$g(P) = \frac{\partial u}{\partial z} = 2\gamma\rho \int \int \frac{z' dx' dz'}{x'^2 + z'^2} \quad (2.36)$$

Dan integrasi atas hasil x :

$$g = 2\gamma\rho \int \left[\arctan \frac{x'_2}{z'} - \arctan \frac{x'_1}{z'} \right] dz' \quad (2.37)$$

Dimana x_1 dan x_2 keduanya merupakan fungsi dari z dan seperti yang ditunjukkan gambar mewakili jalur terpisah di sekitar keliling permukaan penampang. Kedua jalur parsial ini, jika diambil bersama-sama dan mempertimbangkan perubahan tanda, sama dengan integrasi searah jarum jam tunggal di sekeliling, yaitu:

$$g = 2\gamma\rho \oint \arctan \frac{x'}{z'} dz' \quad (2.38)$$

Dengan mengganti parameter *smooth* dengan poligon bersisi-N jadi persamaan:

$$g = 2\gamma\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \arctan \frac{x'}{z'} dz' \quad (2.39)$$

Dimana z_n dan z_{n+1} adalah koordinat z dari dua titik ujung sisi n . ekspresi untuk x' dalam suku z' dan disediakan oleh persamaan garis lurus:

$$x' = a_n z' + \beta_n \quad (2.40)$$

Dimana :

$$a_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n} \quad (2.41)$$

$$\beta_n = \frac{x_n z_{n+1} - x_{n+1} z_n}{z_{n+1} - z_n} \quad (2.42)$$

Sehingga persamaan akhir sebagai berikut :

$$g = 2\gamma\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1+a_n^2} \left[\log \frac{r_{n+1}}{r_r} - a_n (\theta_{n+1} - \theta_n) \right] \quad (2.43)$$

Dimana :

$$r_{n+1} = \sqrt{x_{n+1}^2 + z_{n+1}^2} \quad (2.44)$$

$$r_n = \sqrt{x_n^2 + z_n^2} \quad (2.45)$$

$$\theta_{n+1} = \tan^{-1} \frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} \quad (2.46)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{z_n}{x_n} \quad (2.47)$$

2.3.2.6 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi atau sering yang disebut sistem hidrotermal berbeda-beda pada setiap daerah. Keunikan dari masing-masing sistem ini merupakan hasil interaksi berbagai faktor, antara lain ukuran dan bentuk dari batuan sumber panas, struktur geologi, permeabilitas, topografi, hidrologi permukaan (suhu dan infiltrasi). Adapun komponen-komponen penting dari sistem hidrotermal adalah sumber panas, reservoir dengan fluida termal, daerah resapan (*recharge area*), dan daerah luhan (*discharge*) dengan manifestasi permukaan (Saptadji, 2001).

a) Sumber Panas

Sumber panas pada sistem panas bumi dapat terdiri dari intrusi batuan, dapur magma (*magma chamber*) dan kenaikan suhu karena kedalaman atau gradien temperatur. Gunung api merupakan contoh dimana panas terkonsentrasi dalam jumlah besar. Oleh karena itu, gunung api merupakan sumber panas potensial dari suatu sistem panas bumi, maka daerah yang berada pada jalur gunung api berpotensi besar memiliki sistem panas bumi temperatur tinggi (diatas 225°C).

b) Reservoir

Reservoir panas bumi adalah formasi batuan di bawah permukaan yang mampu menyimpan dan mengalirkan fluida termal (uap dan atau air panas).

Umumnya reservoir panas bumi merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik sehingga fluida dapat terakumulasi untuk dipanaskan oleh sumber panas. Reservoir panas bumi bisa saja ditudungi atau dikelilingi oleh lapisan batuan yang memiliki permeabilitas sangat kecil (*impermeable*). Lapisan ini dikenal sebagai lapisan penudung atau *cap rock*. Batuan penudung ini umumnya terdiri dari mineral-mineral lempung yang mampu mengikat air namun sulit meloloskannya (*swelling*).

c) *Recharge Area* (Daerah Resapan)

Daerah resapan merupakan daerah dimana arah aliran air tanah di tempat tersebut bergerak menjauhi muka tanah. Dengan kata lain, air tanah di daerah resapan bergerak menuju ke bawah permukaan bumi. Dalam suatu lapangan panas bumi, daerah resapan berada pada elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan elevasi dari daerah dimana sumur-sumur produksi berada.

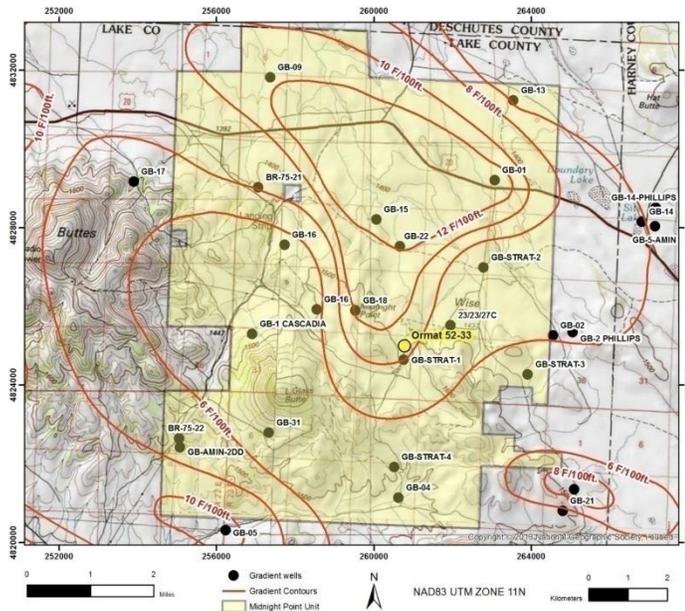
d) *Discharge Area* (Daerah Luahan)

Daerah luahan (*discharge area*) merupakan daerah dimana arah aliran air tanah di tempat tersebut bergerak menuju muka tanah. Daerah luahan pada sistem panas bumi ditandai dengan hadirnya manifestasi di permukaan. Manifestasi permukaan adalah tanda-tanda yang tampak di permukaan bumi yang menunjukkan adanya sistem panas bumi di bawah permukaan di sekitar kemunculannya.

2.4 Penelitian Terdahulu

Pada daerah Glass Buttes, Oregon tahun 2008 dilakukan penelitian oleh sebuah perusahaan eksplorasi *geothermal* yaitu Ormat Nevada Technologies Inc. yang berasal dari negara Amerika Serikat. Tujuan dari penelitian yang dilakukan saat itu adalah untuk survei eksplorasi untuk menentukan lokasi sumur pertama yang memiliki resiko paling kecil. Dengan menggunakan data LIDAR yang memiliki resolusi tinggi untuk memetakan hubungan patahan dan litologi di atas permukaan serta melakukan survei gaya berat dan survei *aeromagnetic* untuk memetakan

manifestasi bawah permukaan sebagai data yang utama. Selain itu juga terdapat data pendukung seperti data *airborne hyperspectral* untuk data petrologi batuan dan alterasi mineral disepanjang patahan yang ada didaerah penelitian. Berdasarkan hasil dari penelitian kumpulan alterasi yang terjadi didaerah penelitian menjelaskan bukan hanya karakteristik geokimia dan temperature penyebab fluida hidrotermal namun juga dapat menjelaskan secara spesifik area *upflow* sepanjang sesar. Interpretasi awal pada data-data tersebut sangat berharga namun masih menunjukkan beberapa hasil yang ambigu dan terkadang menunjukkan struktur geologi yang saling bertentangan antar metodenya. Sehingga dilakukan survei metode *magnetotelluric* (MT) untuk memperlihatkan struktur secara lebih detail. Hasil interpretasi dari 5 dataset digabungkan dengan litologi permukaan dan data temperatur dari sumur sebelumnya digunakan untuk memprediksi dimana area yang memiliki permeabilitas tinggi dan fluida panas. Selain itu juga, digunakan 2 lubang bor kecil untuk menguji model sumber daya yang terdapat di daerah penelitian.



Gambar 2. 12 Lokasi sumur *drilling* (Waish, dkk, 2015)