

**PENDUGAAN LOKASI, KANDUNGAN FLUIDA, DAN  
TEMPERATUR RESERVOIR MENGGUNAKAN METODE  
MAGNETIK DAN GEOKIMIA PADA WILAYAH GUNUNG  
PANDAN JAWA TIMUR**

**SKRIPSI**

Oleh :

**HAKAM EZRA ELYUSA  
145090701111016**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2018**



**PENDUGAAN LOKASI, KANDUNGAN FLUIDA, DAN  
TEMPERATUR RESERVOIR MENGGUNAKAN METODE  
MAGNETIK DAN GEOKIMIA PADA WILAYAH GUNUNG  
PANDAN JAWA TIMUR**

**SKRIPSI**

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik  
dalam bidang fisika

Oleh :

**HAKAM EZRA ELYUSA**  
**145090701111016**



**JURUSAN FISIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**MALANG**  
**2018**



## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### PENDUGAAN LOKASI, KANDUNGAN FLUIDA, DAN TEMPERATUR RESERVOIR MENGGUNAKAN METODE MAGNETIK DAN GEOKIMIA PADA WILAYAH GUNUNG PANDAN JAWA TIMUR

Oleh :  
**HAKAM EZRA ELYUSA**  
**145090701111016**

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji  
pada tanggal .....  
dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik dalam bidang fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

(Sukir Maryanto, Ph.D.)  
NIP. 19710621 199802 1 001

(Susilo Tugas Pinilih, BE)  
NIP.19520917 197804 1 002

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Fisika  
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

(Prof. Dr.rer.nat. Muhammad Nurhuda)  
NIP. 19640910 19902 1 001



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



**LEMBAR PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

**Nama** : Hakam Ezra Elyusa  
**NIM** : 145090701111016  
**Jurusan** : Fisika  
**Penulis Skripsi Berjudul** :

*Pendugaan Lokasi, Kandungan Fluida, dan Temperatur Reservoir  
Menggunakan Metode Magnetik dan Geokimia pada Wilayah  
Gunung Pandan Jawa Timur*

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain. Karya-karya dari nama-nama yang tercantum di daftar pustaka digunakan semata-mata sebagai referensi atau acuan.
2. Apabila pada kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung semua resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 23 Agustus 2018  
Yang menyatakan

Hakam Ezra Elyusa  
NIM. 145090701111016



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

# PENDUGAAN LOKASI, KANDUNGAN FLUIDA, DAN TEMPERATUR RESERVOIR MENGGUNAKAN METODE MAGNETIK DAN GEOKIMIA PADA WILAYAH GUNUNG PANDAN JAWA TIMUR

## ABSTRAK

Energi panas bumi memiliki manfaat secara langsung dan tidak langsung. Pemanfaatan energi panas bumi secara tidak langsung membutuhkan beberapa tahapan untuk mendapatkan hasilnya. Tahapan tersebut dimulai dengan penelitian awal yang dilaksanakan dengan menggunakan metode geofisika, geokimia, dan geologi. Tahapan awal ini sangat penting untuk dilakukan karena menentukan layak tidaknya suatu wilayah prospek panas bumi untuk dilakukan tahapan eksplorasi lebih lanjut. Dalam penelitian ini dilakukan penelitian dengan metode geokimia dan magnetik untuk menentukan lokasi reservoir, kandungan fluida manifestasi, dan temperatur reservoir. Metode geokimia digunakan untuk menentukan kandungan fluida manifestasi dan temperatur reservoir berdasarkan kandungan kimia dari fluida manifestasi. Metode magnetik digunakan untuk mencari anomali magnetik rendah yang diartikan sebagai adanya aktifitas panas dibawah permukaan yang selanjutnya dilakukan pemodelan secara dua dan tiga dimensi untuk menganalisa keberadaan reservoir panas bumi. Menurut diagram Trilinear geokimia menunjukkan bahwa manifestasi yang ada menunjukkan adanya aliran hidrotermal secara *outflow* dan *upflow*. Sedangkan temperatur reservoir panas bumi wilayah gunung pandan diklasifikasikan dalam temperatur sedang yaitu 125-225°C. Hasil penelitian dengan metode magnetik menunjukkan persebaran nilai residual magnetik dengan rentang nilai -77,471 sampai 75,759 nT dimana nilai magnetik rendah yang merepresentasikan adanya aktifitas panas dibawah permukaan berada pada timur laut dan barat wilayah penelitian.

**Kata kunci** : metode magnetik, metode geokimia, diagram Trilinear, manifestasi panas bumi, anomali magnetik.



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



# DETERMINE LOCATION, FLUIDS CONTENT, AND TEMPERATURE OF RESERVOIR USING MAGNETIC AND GEOCHEMISTRY METHODS ON MT PANDAN EAST JAVA

## ABSTRACT

Geothermal energy has direct and indirect use. Utilization of geothermal energy indirectly requires several steps to get the results. These stages begin with initial research conducted using geophysical, geochemical, and geological methods. This initial stage is very important to do because it determines the feasibility of a geothermal prospect region for further exploration stage. In this research, geochemical and magnetic methods is used to determine the location of reservoir, fluid content manifestation, and reservoir temperature. Geochemical methods are used to determine the fluid content of manifestation and reservoir temperature based on the chemical content of the manifestation fluid. The magnetic method is used to find a low magnetic anomaly which is defined as the existence of sub-surface heat activity, which is then done two and three dimensional modeling to analyze the existence of geothermal reservoir. According to Trilinear geochemical diagram shows that the existing manifestations show the outflow and upflow hydrothermal. While the temperature of geothermal reservoir of Mt Pandan area is classified in medium temperature that is 125-225 ° C. The result of the research by magnetic method shows the spread of magnetic residual value with the range of -77,471 to 75,759 nT where the low magnetic value representing the existence of subsurface heat activity is in the northeast and west of the research area.

**Keywords** : Magnetic method, Geochemical method, Trilinear diagram, Geothermal manifestation, magnetic anomaly



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta anugrah nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Skripsi yang berjudul **Analisa Prospek Panas bumi Menggunakan Metode Magnetik dan Geokimia untuk Pendugaan Lokasi, Kandungan Fluida, dan Temperatur Reservoir pada Wilayah Gunung Pandan Jawa Timur**. Proposal ini disusun untuk memenuhi syarat dalam meraih gelar sarjana Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya.

Tiada lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu mendukung proses penulisan. Karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada

1. Bapak Prof. Dr. Rer. Nat. Muhammad Nurhuda selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.
2. Bapak Sukir Maryanto Ph.D selaku Dosen Pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan, serta memberi saran kepada penulis.
3. Bapak Susilo selaku dosen pembimbing di Kementerian ESDM yang sudah sangat membantu dan bersedia untuk meljangkan waktunya demi terbentuknya skripsi ini.
4. Bapak Wasis M.AB selaku dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan motivasi.
5. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Fisika yang sudah bersedia memberikan bimbingan dan saran.
6. Bapak Purnomo selaku Laboran Laboratorium Geofisika Universitas Brawijaya yang telah memberikan bantuan.
7. Mas Andre, Mas Dukhan, Mas Risiko, Mas Vincent, Mas Dafiqi selaku kakak tingkat yang bersedia menjadi teman diskusi dan telah banyak membantu kelancaran penulisan skripsi.
8. Keluarga Geofisika angkatan 2014 Universitas Brawijaya yang telah banyak memberi motivasi selama proses penulisan.

Penulis menyadari akan kekurangan sebagai manusia yang tidak mungkin luput dari kesalahan, penulisan laporan kegiatan ini tidaklah sempurna. Maka dari itu, penulis senantiasa berbesar hati untuk

menerima masukan kritik maupun saran secara langsung maupun tidak melalui surel *hakam.elyusa@gmail.com*. Demikian, semoga skripsi ini berguna dan memperkaya pengetahuan serta bermanfaat bagi pembaca juga bagi penulis untuk melakukan evaluasi kedepanya.

Malang, 23 Agustus 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PERNYATAAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Pembentukan Panas Bumi.....	5
2.2 Sistem Panas Bumi .....	6
2.3 Geologi Regional Wilayah Gunung Pandan.....	11
2.4 Karakteristik Fluida Panas Bumi .....	12
2.5 Geotermometer Fluida.....	13
2.5.1. Geotermometer Silika (Fournier, 1977) .....	13
2.5.2. Geotermometer Na-K (Fournier, 1979; Giggenbach, 1998) .....	14
2.5.3. Geotermometer Na-K-Ca (Fournier dan Truesdell, 1973) .....	15
2.6 Metode Geokimia Diagram Trilinear .....	16
2.6.1. Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> .....	17



2.6.2. Cl-Li-B .....	17
2.6.3 K-Na-Mg .....	18
2.7 Medan Magnetik dan Potensial Magnetik .....	19
2.8 Gaya Antar Kutub Magnet.....	21
2.9 Elemen Medan Magnetik.....	22
2.10 Anomali Medan Magnetik.....	23
2.11 Sifat Kemagnetan Batuan .....	24
2.12 Suseptibilitas Kemagnetan.....	26
2.13 Medan Magnet Bumi .....	27
2.13.1. Medan Magnet Utama .....	29
2.13.2. Medan Magnet Luar .....	29
2.13.3. Anomali Medan Magnet .....	30
2.14 Koreksi Metode Magnetik .....	30
2.14.1. Koreksi Diurnal (harian) .....	30
2.14.2. Koreksi IGRF.....	31
2.14.3. Pemfilteran dengan <i>Butterworth</i> .....	31
2.14.4. Reduksi ke Kutub Magnet.....	32
2.14.5. Koreksi Efek Regional.....	33
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>35</b>
3.1 Lokasi Penelitian .....	35
3.2 Data Penelitian.....	35
3.2.1 Data Anomali Medan Magnet.....	35
3.2.2 Kandungan Kimia Fluida Reservoir .....	35
3.3 Prosedur Penelitian.....	36
3.3.1 Pengolahan Data Magnetik.....	36
3.3.2 Pengolahan Data Geokimia .....	38



3.3.3	Interpretasi Data Magnetik .....	39
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	41
3.4.1	Diagram Pengolahan Data Geokimia .....	41
3.4.2	Diagram Pengolahan Data Magnetik .....	42
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
4.1	Manifestasi Daerah Panas bumi Gunung Pandan.....	43
4.2	Analisa Magnetik Wilayah Panasbumi Gunung Pandan.....	43
4.2.1	Anomali Magnetik Total .....	44
4.2.2	Anomali Regional.....	45
4.2.3	Interpretasi Kualitatif.....	46
4.2.4	Interpretasi Kuantitatif .....	48
4.2.5	Pemetaan Lokasi Reservoir .....	58
4.3	Analisa Metode Geokimia.....	61
4.3.1	Analisa Tipe Air .....	61
4.3.2	Asal Air Panas.....	63
4.3.3	Nilai Temperatur Reservoir dan Kesetimbangan Fluida.....	<b>65</b>
4.3.4	Analisa Geotermometer .....	66
4.3.5	Nilai Temperatur Reservoir Berdasarkan <i>Crossplot</i> Na- K/Mg-Ca .....	67
4.3.6	Pembahasan Analisa Geokimia.....	67
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>69</b>
5.1	Kesimpulan .....	69
5.2	Saran.....	70
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>71</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>75</b>





**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Kerak bumi, mantel, dan inti bumi.....	5
<b>Gambar 2.2</b> Konseptual model sistem panas bumi.....	6
<b>Gambar 2.3</b> Model sistem panas bumi .....	8
<b>Gambar 2.4</b> Model Sistim Panasbumi di Lapangan Awibengkok Gunung Salak.....	9
<b>Gambar 2.5</b> Model Sistim Panasbumi di Lapangan Awibengkok Gunung Salak.....	10
<b>Gambar 2.6.</b> Diagram Trilinear Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> .....	11
<b>Gambar 2.7.</b> Diagram Trilinear Cl-Li-B.....	18
<b>Gambar 2.8.</b> Diagram Triliner Na-K-Mg.....	18
<b>Gambar 2.9.</b> Potensial Skalar Magnetik.....	20
<b>Gambar 2.10.</b> Elemen-elemen medan magnet.....	23
<b>Gambar 2.11.</b> Peta Isoklinik yang menunjukkan inklinasi konstan, interval kontur 10°, berdasarkan IGRF 1990.....	27
<b>Gambar 2.12.</b> Peta Isogonik yang menunjukkan deklinasi konstan, interval kontur 10°, berdasarkan IGRF 1990.....	28
<b>Gambar 2.13.</b> Peta Isodinamik yang menunjukkan intensitas total, interval kontur 2.500 nT, berdasarkan IGRF 1990.....	28
<b>Gambar 2.14.</b> Prinsip kontinuitas ke atas dari permukaan horizontal.....	32
<b>Gambar 2.15.</b> Anomali magnetik dan anomali hasil reduksi ke kutub.....	33
<b>Gambar 3.1</b> <i>Butterworth filter</i> untuk memperoleh anomali regional.....	37
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Alir Metode Magnetik.....	41
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Alir Metode Geokimia.....	42
<b>Gambar 4.1</b> Kontur anomali magnetik total.....	44
<b>Gambar 4.2</b> Anomali regional.....	47
<b>Gambar 4.3</b> Peta kontur anomali residual.....	48
<b>Gambar 4.4</b> Peta kontur anomali residual reduksi ke kutub.....	49
<b>Gambar 4.5</b> Wilayah pemodelan anomali residual.....	51
<b>Gambar 4.6</b> Model inversi metode magnetik daerah panas bumi Gunung Pandan.....	52
<b>Gambar 4.7</b> Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Jari xx' ..	53
<b>Gambar 4.8</b> Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Jari yy' ..	54

<b>Gambar 4.9</b> Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Banyukuning xx’	55
<b>Gambar 4.10</b> Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Banyukuning yy’	56
<b>Gambar 4.11</b> Lintasan pemodelan secara <i>forward</i> pada anomali residual	57
<b>Gambar 4.12</b> Model <i>forward</i> pada wilayah panas bumi Gunung Pandan	58
<b>Gambar 4.13</b> Tampak utara model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,01 sampai 0,07	59
<b>Gambar 4.14</b> Tampak timur model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,01 sampai 0,07	60
<b>Gambar 4.15</b> Tampak bawah model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,01 sampai 0,07	60
<b>Gambar 4.16</b> Diagram Trilinear Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> wilayah panas bumi Gunung Pandan	61
<b>Gambar 4.17</b> Diagram Trilinear Cl-Li-B wilayah panas bumi Gunung Pandan	63
<b>Gambar 4.18</b> Ploting rasio Cl/B menunjukkan air manifestasi berasal dari reservoir yang sama	64
<b>Gambar 4.19</b> Diagram Trilinear Na-K-Ca wilayah panas bumi Gunung Pandan	65
<b>Gambar 4.20</b> Crossplot Na-K/Mg-Ca untuk menentukan temperatur reservoir	67
<b>Gambar L 2</b> Peta geologi lembar Bojonegoro	76
<b>Gambar L 3</b> Desain survei metode magnetik wilayah Gunung Pandan	77

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Temperatur reservoir hasil perhitungan Geotermometer air.....	66
Tabel 4.2	Klasifikasi Sistem Panas bumi.....	68
Tabel L 1.1	Kandungan kimia manifestasi wilayah Gunung Pandan.....	66
Tabel L 1.2	Koordinat Manifestasi Gunung Pandan.....	75
Tabel L 4	Suseptibilitas batuan (Telford, 1990).....	78
Tabel L 5	Data hasil akuisisi.....	80
Tabel L 6	Suseptibilitas batuan (Hunt et al, 1995).....	84





**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data geokimia manifestasi.....	<b>75</b>
Lampiran 2. Peta Geologi Bojonegoro.....	<b>76</b>
Lampiran 3. Desain survei metode magnetik.....	<b>77</b>
Lampiran 4. Nilai suseptibilitas batuan oleh (Telford, 1990).....	<b>78</b>
Lampiran 5. Data hasil akuisisi.....	<b>80</b>
Lampiran 6. Suseptibilitas Batuan menurut Clark dan Emerson (1991) dan Hunt et al. (1995).....	<b>84</b>





**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi merupakan salah satu energi alternatif yang dapat dimanfaatkan secara langsung maupun tidak langsung. Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung dapat diaplikasikan di bidang perikanan, pertanian, pariwisata, dll. Sedangkan pemanfaatan secara tidak langsung dapat diartikan bahwa apabila ingin mendapatkan manfaatnya harus dilakukan melalui berbagai tahapan. Contoh pemanfaatan secara tidak langsung yaitu sebagai penghasil energi listrik atau sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

Untuk memperoleh energi listrik dari energi panas bumi, dibutuhkan beberapa tahapan yang diawali dengan survei lapangan yang berpotensi dijadikan Wilayah Kerja pertambangan (WKP) panas bumi. Survei awal terdiri dari berbagai penelitian yang dilakukan beberapa bidang yaitu bidang geologi, geofisika, dan geokimia. Apabila hasil dari survei awal dirasa memadai maka dilakukan tahap eksplorasi awal, dilanjutkan eksplorasi lanjut, kemudian eksplorasi produksi, dan selanjutnya tahap pengembangan.

Demi mendapatkan energi panas bumi yang optimal dibutuhkan ahli dibidang geologi, geofisika, dan geokimia pada survei awal. Ahli geologi menganalisa struktur geologi, sistem vulkanis dan umur batuan, ahli geofisika menganalisa parameter fisis batuan dan struktur bawah permukaan, sedangkan ahli geokimia menganalisa tipe dan tingkat maturasi air, asal air panas manifestasi, dan sistem fluida.

Untuk wilayah Gunung Pandan sendiri belum pernah ada penelitian berupa survei Geofisika yang bertujuan untuk memetakan potensi panas bumi. Survei Geofisika yang pernah dilakukan yaitu survei Geolistrik yang bertujuan untuk mendeteksi kemungkinan adanya patahan aktif di sekitaran area gunung Pandan untuk mengetahui penyebab sering terjadinya gempa di wilayah Bojonegoro selatan.

Pada penelitian ini dilakukan yang lebih spesifik lagi yaitu menggunakan metode geofisika magnetik atau geomagnetik dipadukan dengan metode geokimia. Metode geomagnetik digunakan untuk mengetahui zona demagnetisasi batuan yang menandakan adanya aktifitas panas bumi di bawah permukaan yang selanjutnya dapat diketahui juga arah kemenerusan sistem panas bumi nya. Metode geokimia dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang temperatur, komposisi, dan asal fluida reservoir yang diketahui dari manifestasi yang ada. Kedua metode tersebut sangat penting untuk dilakukan untuk memperoleh informasi seberapa layak daerah survei untuk dijadikan Wilayah Kerja Pertambangan (WKP) panas bumi.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah penelitian ini jika ditinjau dari latar belakang yaitu :

1. Bagaimana struktur bawah permukaan berdasarkan pemodelan dua dimensi dengan metode magnetik?
2. Bagaimana pendugaan lokasi reservoir berdasarkan interpretasi pemodelan tiga dimensi dari anomali medan magnetik?
3. Bagaimana analisa geokimia terhadap fluida manifestasi?
4. Bagaimana cara memperkirakan temperatur fluida reservoir?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini ialah :

1. Menentukan struktur bawah permukaan berdasarkan pemodelan dua dimensi dengan metode magnetik
2. Menentukan lokasi reservoir berdasarkan interpretasi pemodelan dari peta kontur magnetik residual
3. Menentukan hasil analisa geokimia terhadap fluida manifestasi
4. Menentukan temperatur fluida reservoir.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu mendapatkan informasi bawah permukaan, perkiran lokasi, temperatur fluida reservoir, dan kandungan fluida reservoir.

## 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian kali ini yaitu :

1. Pemodelan *inversi* dan *forward* dilakukan dengan mengacu pada peta anomali residual magnetik.
2. Lokasi penelitian terletak di kompleks gunung Pandan dengan batas koordinat geografis antara 582.744 – 596.569 mE dan 9.170.881 – 9.184.726 mS pada sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* WGS 84 zona 49 *Southern*.
3. Data potensial yang digunakan yaitu data potensial magnetik dan geokimia.
4. Data geokimia yang digunakan untuk analisa yaitu berasal dari analisa kimia pada sampel air panas manifestasi.

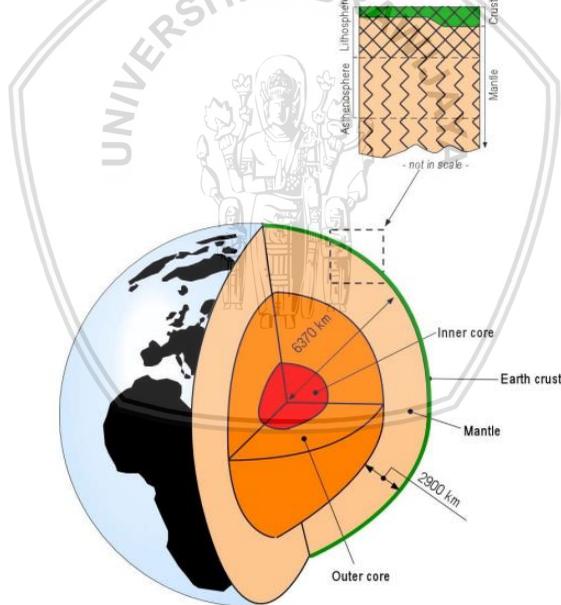


**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembentukan Panas Bumi

Bumi memiliki inti yang terdiri dari inti bagian dalam dan luar. Inti bagian dalam berupa padatan atau solid, sedangkan inti bagian luar berupa cair. Gambar 2.1 menunjukkan bahwa di atas inti terdapat mantel bumi. Bagian luar mantel disebut astenosfer, tersusun atas material leleh panas bersilat plastis yang disebut magma. Di bawah astenosfer terdapat mesosfer yang tersusun atas batuan yang lebih kuat dan padat dibandingkan astenosfer. Panas pada awal pembentukan bumi serta panas diakibatkan oleh peluruhan unsur-unsur radioaktif yang merupakan sumber panas tubuh bumi dan



**Gambar 2.1** Kerak bumi, mantel, dan inti bumi (Dickson, 2004)

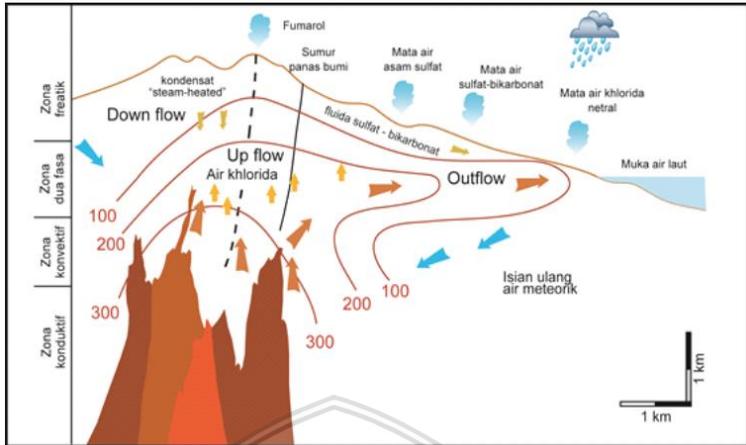
pengontrol aliran panas di permukaan bumi. Proses-proses pada bagian dalam bumi dapat menyebabkan lempeng-lempeng kerak bumi bergerak saling menjauhi saling bertumbukan maupun saling menggeser satu terhadap yang lain. Daerah batas antar lempeng yang saling menjauhi dan yang saling bertumbukan umumnya berasosiasi dengan aktivitas magmatisme. Sumber energi panas bumi pada umumnya terkonsentrasi pada daerah-daerah sepanjang batas antar lempeng yang aktif (Utammi, 1998).

Bagian terdalam dari bumi adalah inti bumi yang mempunyai ketebalan sekitar 3450 kilometer. Lapisan ini mempunyai temperatur dan tekanan yang sangat tinggi sehingga lapisan ini berupa lelehan yang sangat panas yang diperkirakan mempunyai densitas sekitar 10,2–11,5 gr/cm. Diperkirakan temperatur pada pusat bumi dapat mencapai sekitar 6000°F.

Kulit bumi dan bagian teratas dari selubung bumi kemudian dinamakan litosfir (80 - 200 km). Bagian selubung bumi yang terletak tepat di bawah litosfir merupakan batuan lunak tapi pekat dan jauh lebih panas. Bagian dari selubung bumi ini kemudian dinamakan astenosfer (200 - 300 km). Di bawah lapisan ini, yaitu bagian bawah dari selubung bumi terdiri dari material-material cair, pekat, dan panas, dengan densitas sekitar 3,3–5,7 gr/cm<sup>3</sup> (Saptadji, 1997)

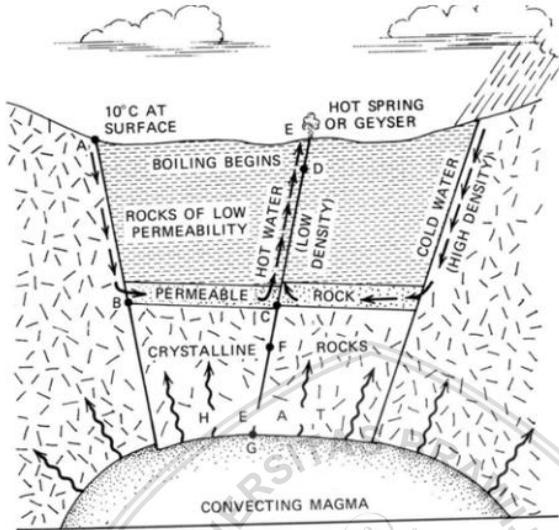
## 2.2 Sistem Panas Bumi

Empat elemen penting yang berpengaruh dalam sistem panas bumi, yaitu: sumber panas, reservoir, batuan penudung, dan fluida. Sumber panas pada lapangan panas bumi adalah magma yang berasal dari kedalaman 50-100 km bergerak ke atas yang kemudian mengintrusi lapisan-lapisan batuan dengan membawa temperatur yang tinggi (900-1200 °C) menuju kedalaman dangkal sekitar 2-10 km dibawah permukaan. Model sistem panas bumi atau biasa disebut konseptual model dibuat berdasarkan hasil evaluasi data geologi, hidrologi, geofisika, geokimia, dan data sumur (Saptadji, 1997). Gambar 2.2 menunjukkan suatu konseptual model yang ada pada suatu sistem panas bumi khususnya tipe *High Terrain*.



**Gambar 2.2** Konseptual model sistem panas bumi (Utami dkk, 2010)

Setiap sistem hidrotermal mempunyai karakteristik yang unik, satu sama lain berbeda, tidak hanya dari manifestasi permukaannya tetapi juga karakteristik reservoirnya. Keunikan dari masing-masing sistem merupakan hasil interaksi berbagai faktor, antara lain ukuran dan bentuk dari batuan sumber panas, struktur geologi, permeabilitas, topografi, hidrologi permukaan (suhu dan infiltrasi). Beberapa contoh model sederhana diperlihatkan pada Gambar 2.3 sampai 2.5.

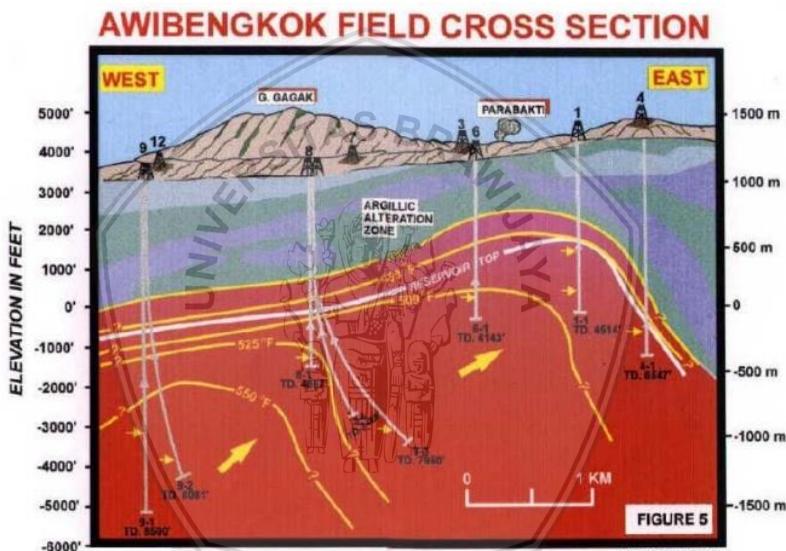


**Gambar 2.3** Model sistem panas bumi (White, 1967)

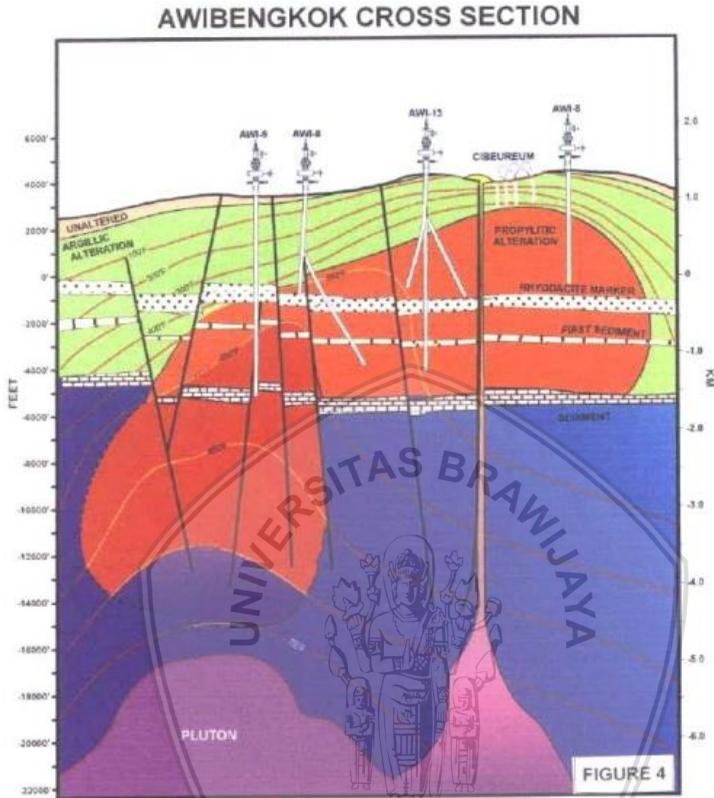
Gambar 2.3 memperlihatkan model dari White (1967), yang dengan jelas memperlihatkan idenya mengenai sirkulasi fluida di suatu sistem hidrotermal. Ia berpendapat bahwa fluida panasbumi berasal dari air permukaan (*meteoric water*) yang masuk ke batuan di bawah permukaan melalui rekahan-rekahan atau batuan permeabel. Di bawah permukaan air tersebut bila kontak dengan batuan panas akan menjadi panas. Karena air panas lebih ringan dari air dingin, maka air panas akan cenderung bergerak ke atas, yang apabila struktur geologi memungkinkan maka air tersebut akan mengalir melalui rekahan-rekahan dan atau batuan permeabel, kemudian muncul di permukaan sebagai mata air panas, geyser, dan manifestasi panas bumi lainnya. Perubahan fasa bisa saja terjadi dalam perjalanannya, yaitu pada saat temperatur air telah mencapai temperatur saturasinya atau temperatur titik didihnya. Bila hal itu terjadi maka fluida akan berupa campuran uap air. Apabila pada kedalaman tertentu temperatur

air lebih besar dari temperatur saturasinya maka di dalam sistim hanya terdapat satu fasa saja, yaitu fasa uap. Teori tersebut di atas jelas memperlihatkan bahwa manifestasi panasbumi di permukaan pada dasarnya merupakan ekspresi permukaan dari suatu sistem konveksi yang sangat besar.

Gambar 2.4 dan 2.5 memperlihatkan model sistem panas bumi di lapangan Awibengkok Gunung Salak. Sumur-sumur yang dibor di lapangan ini telah membuktikan bahwa sistem panasbumi yang terdapat di lapangan tersebut merupakan sistem dominasi air yang mempunyai temperatur 220-230 °C.



**Gambar 2.4** Model Sistem Panasbumi di Lapangan Awibengkok Gunung Salak (Gunung Salak Geothermal Project Guide Book, 1996 dalam Saptadji, 1992)



**Gambar 2.5** Model Sistem Panasbumi di Lapangan Awibengkok Gunung Salak (Gunung Salak Geothermal Project Guide Book, 1999 dalam Saptadji, 1992).

Seperti diperlihatkan pada Gambar 2.3 sampai 2.5, tiap sistem panas bumi mempunyai keunikan yang berbeda-beda, tapi menurut Henley dan Ellis (1983) pada dasarnya ada dua prototipe model sistem hidrotermal bertemperatur tinggi, yaitu model sistem hidrotermal yang terdapat di daerah datar (*flat terrain*) dan di daerah pegunungan (*high terrain*). Pada sistem hidrotermal yang terdapat di daerah datar airnya berasal dari permukaan *meteoric water*. Panas dengan sejumlah kecil air, klorida, gas, dan ion-ion yang terlarut lainnya diperoleh dari magma yang terdapat di bawahnya. Hal ini menyebabkan bagian

bawah dari sistem berisi air Klorida yang bersifat hampir netral sedangkan bagian atasnya adalah zona dua fasa. Pemisahan fasa uap yang terjadi di dekat permukaan menyebabkan terbentuknya fumarol di permukaan. Percampuran antara kondesat (hasil kondensasi uap) dengan air tanah menyebabkan terbentuknya air asam sulfat dan bikarbonat. Bercampurnya berbagai jenis air pada kedalaman dangkal menghasilkan air dengan komposisi sangat beraneka ragam. *Outflow* atau air panas yang muncul di permukaan (mata air panas) adalah air klorida, jarang air bikarbonat. Contoh dari sistem jenis ini adalah sistem panas buni yang terdapat di Taupo *Volcanic Zone*, Selandia Baru.

### 2.3 Geologi Regional Wilayah Gunung Pandan

Daerah penelitian termasuk di bagian selatan peta geologi regional lembar Bojonegoro, Jawa Timur. Fisiografi daerah survei merupakan lajur Kendeng di bagian selatan yang terdiri atas perbukitan berbentuk kasar dan lereng agak landai sampai curam. Satuan batuan sebagian besar terdiri atas batuan sedimen seperti batuan lempung karbonat, batu lempung dan batu pasir, serta satuan batuan gunung api yang berasosiasi dengan sistem panas bumi daerah penelitian (Pringgoprawiro, 1992).

Pada zaman Plistosen di Mendala Geologi Kendeng terjadi pengangkatan dan pensesaran yang cukup kuat, sehingga pada Plistosen akhir terbentuk suatu daratan yang disusul oleh pengendapan sedimen berfasies darat hingga kini. Pada kala Plistosen Akhir-Holosen, muncul batuan terobosan berupa andesit piroksen dan breksi Gunung Pandan (andesit bongkah), yang merupakan kegiatan vulkanik muda. Sebaran vulkanik muda ini dijumpai mulai dari Gunung Takir di Selatan, menerus ke utara berupa Gunung Pandan, Gunung Buntung, dan Gunung Nangka. Nama lain dari kompleks yang berkembang dari selatan ke arah utara daerah survei ini adalah Pandan Vulkanik (Van Bemmelen, 1949) dan *Young Volcanics* (Marks, 1957).

Kemunculan batuan vulkanik dan mata air panas kemungkinan dikontrol oleh struktur yang juga mempengaruhi pola aliran sungai di daerah ini. Aktifitas vulkanik di Gunung Pandan masa lampau tidak mencerminkan vulkanisme normal dalam artian melalui

erupsi dengan produk yang terdiri atas aliran lava, piroklastik aliran, dan piroklastik jatuhan serta proses sekunder berupa lahar.

Kegiatan vulkanisme daerah kompleks Gunung Pandan lebih berasosiasi dengan tektonik dan struktur sehingga produk yang dihasilkan hanya berupa aliran lava berstruktur bongkah *Blocky Lava Flows* yang membentuk beberapa kerucut vulkanik baik yang berbentuk terobosan *intrusi* maupun kerucut lava. Sementara batuan sedimen yang terdapat di sekelilingnya juga mempunyai ketinggian relatif lebih rendah dengan lereng cukup landai dengan struktur sesar, pelipatan, dan kekar di beberapa tempat.

## 2.4 Karakteristik Fluida Panas Bumi

Komposisi kimia fluida panas bumi dipengaruhi oleh adanya interaksi antara batuan dan air. Anion yang terkandung dalam air panas bumi dapat menunjukkan proses interaksi tersebut. Konsentrasi masing-masing unsur terlarut seperti Cl, HCO<sub>3</sub>, dan SO<sub>4</sub> dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tipe air panas dari suatu sistem panas bumi yang dapat pula dievaluasi dengan menggunakan diagram trilinear Cl-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> (Sukhyar dkk, 2014).

Tipe air yang pertama yaitu Klorida, tipe air ini banyak ditemukan pada area dengan sistem panas bumi temperatur tinggi. Wilayah yang memiliki mata air panas yang mengalir dalam skala besar dengan konsentrasi Cl yang tinggi berasal dari reservoir dalam dan merupakan indikasi dari zona permeabel pada area tersebut (Aribowo dan Heri, 2012). Mata air panas Cl dengan debit keluaran dan temperatur yang tinggi merupakan air yang paling representatif untuk mengetahui kondisi reservoir. Mata air panas Klorida juga dapat menunjukkan zona temperatur tinggi dari suatu sistem panas bumi. Pada sistem panas bumi topografi datar, kemunculan air klorida dapat mengindikasikan zona *upflow* atau bertemperatur tinggi. Sementara itu pada topografi tinggi kemunculan jenis ini umumnya berasosiasi dengan zona *Outflow* atau aliran lateral dari suatu sistem panas bumi. Air asam sulfat merupakan fluida yang terbentuk pada kedalaman dangkal sebagai akibat dari proses kondensasi gas panas bumi yang menuju dekat permukaan (Aribowo dan Heri, 2012).

Air asam sulfat terbentuk di daerah paling dangkal pada sistem panas bumi, sehingga tidak dapat memberikan indikasi

terhadap kondisi yang lebih dalam dari suatu sistem panas bumi. Air asam sulfat dicirikan dengan  $\text{SO}_4$  yang tinggi, Cl dan  $\text{HCO}_3$  sangat rendah dengan pH rendah (2-3). Biasanya terbentuk kolam lumpur dan pelarutan batuan sekitarnya. Kemunculan air asam sulfat yang disertai fumarol pada sistem panas bumi topografi tinggi merupakan indikasi zona *upflow* (Sukhyar dkk, 2014).

Air tipe Bikarbonat dicirikan dengan kandungan unsur  $\text{HCO}_3$  yang tinggi dengan anion utama  $\text{HCO}_3$  dan kation utama Na, terbentuk didaerah pinggir dan dangkal, terbentuk absorpsi gas  $\text{CO}_2$  dan kondensasinya uap air ke dalam air tanah. Pada sistem panas bumi yang didominasi oleh batuan vulkanik, air bikarbonat umumnya terbentuk di daerah dekat permukaan (Sukhyar, 2014). Air tipe ini memiliki pH yang mendekati netral akibat reaksi batuan lokal (baik reservoir dangkal atau selama proses mengakir ke permukaan).

## 2.5 Geotermometer Fluida

Geotermometer terdiri dari berbagai jenis. Pertimbangan dalam pemilihannya yaitu jenis manifestasi yang berupa air panas dengan temperatur tinggi dan tipe air panas yang termasuk air klorida atau bikarbonat. Komposisi fluida dapat digunakan untuk memperkirakan temperatur bawah permukaan atau biasa disebut sebagai geotermometer. Macam-macam Geotermometer yang digunakan untuk menentukan temperatur reservoir. Geotermometer yang paling penting adalah silika, Na-K, dan Na-K-Ca. Geotermometer lainnya didasarkan pada rasio kation dan air tidak bermuatan selama kesetimbangan berlaku. Persamaan temperatur untuk geotermometer merupakan persamaan temperatur untuk konstanta kesetimbangan khusus mengacu pada reaksi mineral dengan larutan tertentu (Karingithi, 2009).

### 2.5.1. Geotermometer Silika (Fournier, 1977)

Fase Silika yang hadir dalam fluida panas bumi adalah kuarsa, kalsedon, dan silika amorf (Arnorsson, 2000). Digunakan berdasarkan pada kelarutan berbagai jenis silika dalam air sebagai fungsi dari temperatur. Reaksi yang menjadi dasar pelarutan silika dalam air adalah :



Pada kebanyakan sistem panas bumi, fluida pada bawah permukaan mengalami pencampuran dengan kuarsa. Untuk menentukan temperatur bawah permukaan dengan menggunakan geotermometer dengan kandungan  $\text{SiO}_2$  dapat menggunakan beberapa persamaan sebagai berikut :

a. Quartz Max Steam Loss

$$t^\circ\text{C} = \frac{1522}{5,75 - \text{Log SiO}_2} - 273 \quad (2.1)$$

dengan  $t = 100 - 250^\circ\text{C}$

b. Quartz No Steam Loss

$$t^\circ\text{C} = \frac{1390}{5,19 - \text{Log SiO}_2} - 273 \quad (2.2)$$

dengan  $t = 50 - 250^\circ\text{C}$

Geotermometer jenis ini baik digunakan untuk reservoir bertemperatur  $>150^\circ\text{C}$ . Pada temperatur  $< 150^\circ\text{C}$ , kalsedon lebih mengontrol kandungan silika terlarut daripada kuarsa (Karingithi, 2009). Dibawah temperatur  $>150^\circ\text{C}$  kandungan silika dikontrol oleh Kalsedon (Simmons, 1998).

### 2.5.2. Geotermometer Na-K (Fournier, 1979; Giggenbach, 1998)

Geotermometer Na-K cocok untuk air klorida yang berasal dari reservoir dengan temperatur tinggi. Rasio Na/K akan semakin membesar apabila temperatur meningkat. Respon rasio konsentrasi Na terhadap K akan menurun terhadap meningkatnya temperatur fluida yang berdasarkan pada reaksi pertukaran kation yang sangat bergantung pada suhu yaitu:



Geotermometer Na-K dapat digunakan untuk memprediksi temperatur pada nilai  $T > 180^\circ\text{C}$ . Tetapi kurang baik apabila digunakan untuk  $T < 100^\circ\text{C}$ . Namun memiliki kelebihan yaitu tidak terpengaruh oleh *steam loss*.

Untuk menentukan temperatur bawah permukaan menggunakan geotermometer Na-K dapat digunakan berbagai persamaan seperti dibawah :

a. Na-K (Fournier)

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{(\text{Log}\frac{\text{Na}}{\text{K}})+1,483} - 273 \quad (2.3)$$

dengan  $t > 180^{\circ}\text{C}$ .

b. Na-K (Giggenbach)

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1390}{(\text{Log}\frac{\text{Na}}{\text{K}})+1,75} - 273 \quad (2.4)$$

dengan  $t > 120^{\circ}\text{C}$ .

Dalam penggunaan persamaan Na/K alangkah lebih baik jika digunakan dua persamaan supaya diperoleh gambaran besar tentang rentangan perbedaanya. Apabila hanya menggunakan satu persamaan saja maka sebaiknya menggunakan persamaan dari Giggenbach karena persamaan tersebut menggunakan nilai tertinggi dari data (Sumintadireja, 2005). Geotermometer jenis ini berlaku untuk temperatur reservoir yang berkisar antara  $180 - 350^{\circ}\text{C}$  (Ellis, 1977).

Geotermometer Na-K memberikan hasil buruk pada temperatur reservoir dibawah  $100^{\circ}\text{C}$  dan tidak cocok digunakan untuk air yang mengandung konsentrasi kalsium (Ca) tinggi seperti pada mata air dengan endapan travertin. Menurut (Karingithi, 2009) aturan yang berlaku untuk penggunaan geotermometer Na-K yaitu :

- Digunakan untuk air yang menunjukkan temperatur reservoir  $> 100^{\circ}\text{C}$ .
- Digunakan jika air mengandung konsentrasi Ca rendah, yaitu ketika nilai  $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,06$  bernilai negatif.
- Digunakan untuk air klorida dengan pH mendekati netral.

### 2.5.3. Geotermometer Na-K-Ca (Fournier dan Truesdell, 1973)

Geotermometer Na-K-Ca memberikan hasil *error* yang rendah untuk reservoir yang berada pada keadaan tidak setimbang sehingga air menjadi dingin dan sedikit panas. Geotermometer ini

digunakan pada air yang memiliki konsentrasi Ca yang tinggi. Geotermometer ini bersifat empiris dengan landasan teori yang belum dipahami secara sempurna (Giggenbach, 1989). Batasan teoritis untuk geotermometer ini adalah ekuilibrium antara Na dan K Felspar serta konvensi mineral kalsium aluminio silikat menjadi kalsit (Simmons, 1998). Asumsi yang digunakan untuk membuat persamaan geotermometer Na-K-Ca adalah ada kelebihan silika dan aluminium tetap berada pada fasa padat.

Formula untuk geotermometer ini adalah:

$$T^{\circ}\text{C} = [16471 (\text{Log} (\text{Na}/\text{K}) + \beta (\log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,06) + 2,47)] - 273,15 \quad (2.5)$$

Apabila,

- $[\log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,06] < 0$ , gunakan  $\beta = 1/3$
- $[\log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,06] > 0$ , gunakan  $\beta = 4/3$

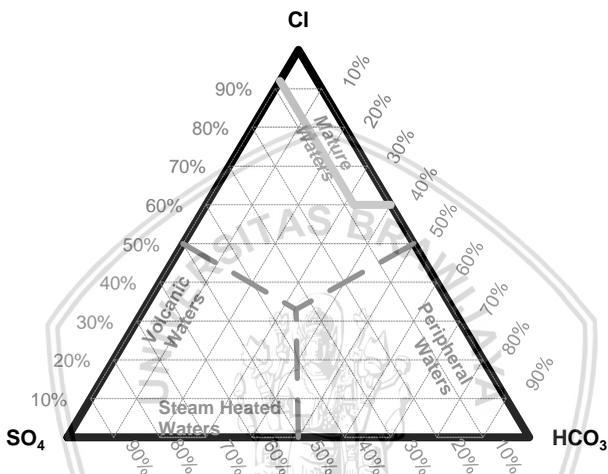
Kisaran temperatur yang bagus untuk penggunaan geotermometer Na-K-Ca adalah 120 – 200 °C, selebihnya tidak terlalu bagus. Kekurangan geotermometer jenis ini yaitu temperatur sangat dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi karena *boiling* dan *dilution*. Boiling menyebabkan kehilangan CO<sub>2</sub>, terjadi pengendapan kalsit, Ca keluar dari larutan, sehingga T hasil perhitungan terlalu tinggi (Simmons, 1998).

## 2.6 Metode Geokimia Diagram Trilinear

Zat terlarut dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu *tracer* dan *geoindikator*, dimana *tracer* secara geokimia bersifat inert atau apabila zat ini ditambahkan ke fluida maka sifatnya akan tetap dan dapat dilacak asal usulnya. Sedangkan *geoindikator* adalah zat terlarut yang bersifat reaktif dan mencerminkan lingkungan kesetimbangan.

### 2.6.1. Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

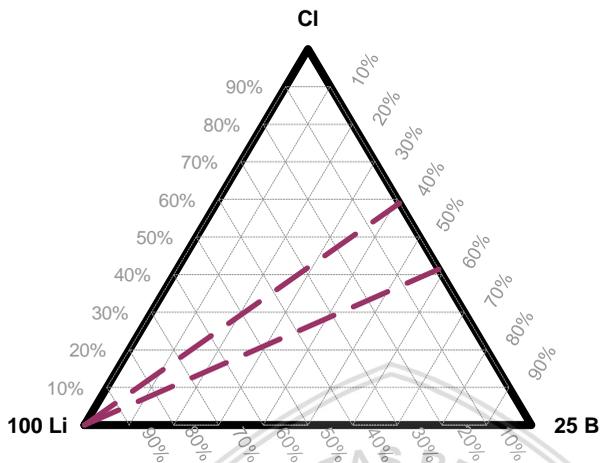
Diagram ini ialah sebuah metode yang digunakan dalam penentuan tipe fluida reservoir dalam rangka menentukan karakteristik suatu reservoir ditunjukkan gambar 2.6. Kandungan kimia yang digunakan sebagai indikatornya adalah klorida (Cl), bikarbonat (HCO<sub>3</sub>), dan sulfat (SO<sub>4</sub>).



Gambar 2.6 Diagram Trilinear Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

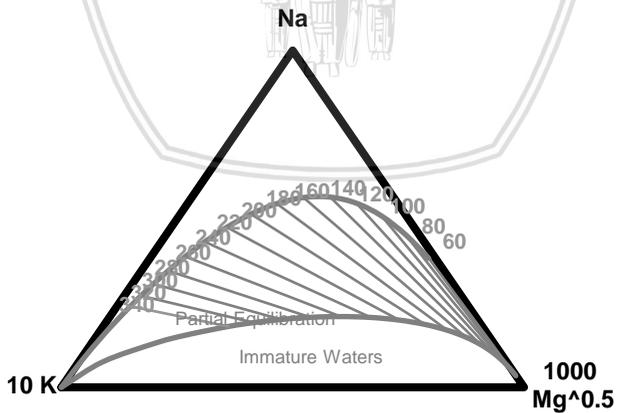
### 2.6.2. Cl-Li-B

Diagram segitiga Cl-Li-B (Gambar 2.7) dapat digunakan untuk menganalisa proses pendidihan dan pengenceran fluida manifestasi berdasarkan perbandingan konsentrasi Cl/100 dan B/4 yang telah diubah dalam persen. Diagram ini juga dapat menentukan zona *upflow* dan zona *outflow* dari sebuah sistem panas bumi.



Gambar 2.7 Diagram Trilinear Cl-Li-B

2.6.3 K-Na-Mg



Gambar 2.8 Diagram Trilinear Na-K-Mg

Diagram Na-K-Mg (Gambar 2.8) merupakan sebuah metode yang digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir dan untuk mengetahui air yang mencapai kesetimbangan litologi. Suatu fluida dikatakan mencapai kesetimbangan air apabila berada plot air manifestasi pada diagram berada pada *Immature water*. Sedangkan untuk menentukan temperatur reservoir berdasarkan pada *weir box* dimana angka yang tertera merupakan nilai temperatur berdasarkan posisi yang didapatkan setelah melakukan penempatan titik kandungan kimia manifestasi

## 2.7 Medan Magnetik dan Potensial Magnetik

Medan magnetik merupakan medan yang bersifat konservatif, maka medan magnetik adalah gradien dari suatu fungsi potensial skalar  $A = (\vec{r})$  yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\vec{H}(\vec{r}) = -\nabla \cdot A(\vec{r}) \tag{2.6}$$

dengan

$$A(\vec{r}) = -\vec{m} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) \tag{2.7}$$

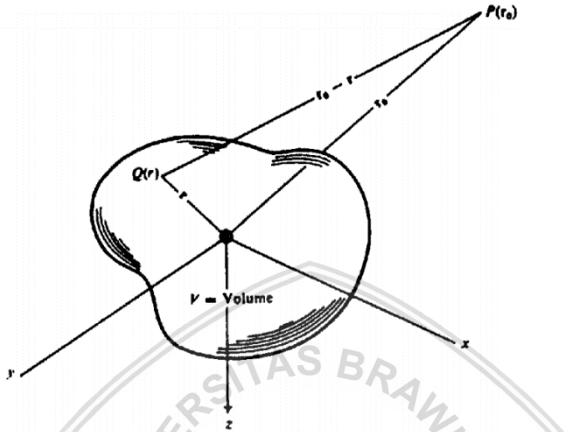
Materi yang bersifat permeabel dan diterapkan pada medan magnetik eksternal akan menghasilkan induksi kemagnetan yang besarnya ditentukan oleh suseptibilitas kemagnetan dari material tersebut. Material yang melingkupi suatu benda bervolume V akan mempunyai momen dipole magnetik per unit volume yang dinyatakan sebagai  $\vec{M}(\vec{r}_o)$ . Potensial skalar magnetik pada titik P di luar V yang ditunjukkan oleh gambar 2.9 dapat dinyatakan seperti persamaan dibawah :

$$A(\vec{r}) = - \int_v \vec{M}(\vec{r}_o) \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}_o|} d^3r_o \tag{2.8}$$

Dengan mensubtitusi persamaan 2.8 ke 2.6 akan diperoleh persamaan :



$$\vec{H}(\vec{r}) = \nabla \int_V (\vec{M} \cdot \nabla) \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} d^3r_0 \quad (2.9)$$



Gambar 2.9 Potensial Skalar Magnetik

Jika diasumsikan bahwa arah magnetisasi adalah sama di dalam V dan dinyatakan dengan simbol  $\alpha$ , maka  $\vec{M} \cdot \nabla = M(\partial/\partial \alpha)$ , sehingga persamaan 2.9

dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \nabla \int_V \vec{M} \cdot (\vec{r}_0) \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} d^3r_0 \quad (2.10)$$

Potensial magnetik diatas permukaan bumi akan memenuhi persamaan Laplace, sedangkan potensial magnetik di dalam bumi memenuhi persamaan Poisson. Integral volume pada fungsi potensial  $A(\vec{r})$  bersifat non-singular untuk titik di luar volume diatas permukaan bumi sehingga memenuhi syarat persamaan Laplace :

$$\nabla^2 \cdot A = 0 \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk titik di dalam volume yang berada di dalam bumi, integral menjadi singular pada  $\vec{r} = \vec{r}_0$ , sehingga memenuhi

persamaan Poisson. Untuk memisahkan *singularitas* ini, dibuat lingkaran kecil dengan jari-jari dan volume  $V$ . Potensial  $A$  dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$A(\vec{r}) = -\nabla \int_{v-v} \frac{M(\vec{r}o)d^3ro}{|\vec{r}-\vec{r}o|} - \nabla \int_v \frac{M(\vec{r}o)d^3ro}{|\vec{r}-\vec{r}o|} \quad (2.12)$$

Suku pertama dalam persamaan 2.12 adalah non *singular* dan harmonik. Jika nilai  $\epsilon$  dianggap cukup kecil dan nilai  $M(\vec{r}o)$  adalah konstan, maka suku kedua dalam persamaan 2.12 dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\nabla^2 A(\vec{r}o) = -\nabla M(\vec{r}o) \int_v \nabla \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}o|} d^2ro \quad (2.13)$$

Menurut teorema Gauss, bentuk integral volume pada persamaan 2.13 dapat diubah menjadi bentuk integral luas yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\nabla^2 A(\vec{r}o) = -\nabla M(\vec{r}o) \int_s n \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}o|} d^2ro \quad (2.14)$$

Dengan  $s$  merupakan permukaan bola kecil dengan jari-jari  $\epsilon$ . Pada persamaan 2.14 nilai  $|\vec{r} - \vec{r}o| = \epsilon$  dan  $n \cdot \nabla = \partial/\partial\epsilon$ . Untuk  $\epsilon \rightarrow 0$  dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\nabla^2 A(\vec{r}o) = -\nabla M(\vec{r}o) \left( \frac{d}{d\epsilon} \frac{1}{\epsilon} \right) 4\pi\epsilon^2 \quad (2.15)$$

$$\nabla^2 A(\vec{r}o) = 4\pi\nabla o \cdot \vec{M}(\vec{r}o) \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 adalah persamaan Poisson yang dinyatakan dengan nilai potensial yang melingkupi suatu area yang dimiliki oleh tubuh batuan magnetik.

## 2.8 Gaya Antar Kutub Magnet

Persamaan medan magnet dan potensial magnet dari magnet yang terisolasi digunakan untuk mendapatkan persamaan medan magnet dipole. Dengan dianalogikan situasi gravitasi diantara dua kutub dalam ruang vakum seperti persamaan dibawah (Sleep dan Fujita, 1997) :

$$F = \frac{\mu_o P_1 P_2}{4 \pi r^2} \quad (2.17)$$

Dimana :

**F** : gaya yang bekerja diantara dua magnet dengan kuat medan magnet  $P_1$  dan  $P_2$  (N)

$\mu_0$  :permeabilitas medium yang melingkupi kedua magnet (N/A<sup>2</sup>)  
 $r$  : jarak kedua magnet (m)  
 $P_1$  dan  $P_2$ : kutub magnet (Am)

Jika dianalogikan gaya gravitasi maka B dan H merupakan gaya persatuan muatan:

$$B = F/P_1 = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} \tag{2.18}$$

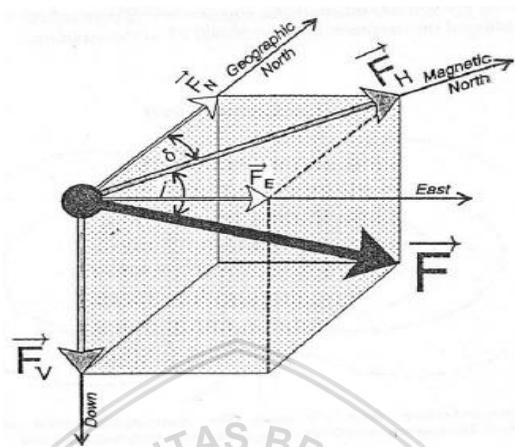
$$H = B/\mu_0 = \frac{P}{4\pi r^2} \tag{2.19}$$

### 2.9 Elemen Medan Magnetik

Medan magnet bumi terkarakterisasi oleh parameter fisis atau yang disebut elemen medan magnet bumi yang dapat diukur meliputi arah dan intensitas kemagnetannya. Parameter fisis tersebut yaitu:

- Deklinasi (D), ialah sudut utara magnetik dengan komponen horizontal yang dihitung dari utara menuju timur.
- Inklinasi (I), ialah sudut yang dibentuk antara medan magnetik total dengan bidang horizontal yang dihitung dari bidang horizontal menuju bidang vertikal ke bawah.
- Medan magnetik utama bumi (F), ialah besar dari vektor medan magnetik total.
- Intensitas Magnetik Horizontal (H), yaitu besar dari medan magnetik total pada bidang horizontal.





**Gambar 2.10** Elemen-elemen medan magnet (Lillie, 1999)

**2.10 Anomali Medan Magnetik**

Anomali medan magnetik total dihitung dari pengukuran medan magnetik total yang dikurangi dengan nilai IGRF (*International Geomagnetics Reference Field*) yang sesuai dengan posisi dan hari akuisisi dilakukan. Anomali medan magnetik bumi total dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah :

$$\Delta T = |\vec{HT}| - |\vec{Ho}| \tag{2.20}$$

Dimana  $\vec{HT}$  merepresentasikan medan magnetik total yang terukur dan  $\vec{Ho}$  ialah medan magnetik bumi.

Jika  $\vec{HA}$  merupakan gangguan dari  $\vec{Ho}$  dikarenakan adanya anomali magnetik, maka medan magnetik total dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\vec{Hr} = \vec{Ho} + \vec{HA} \tag{2.21}$$

Anaomali dari medan magnetik total tidak sama besar dari medan anomali karena :

$$\Delta T = |\vec{H}_0 + \vec{H}_A| - |\vec{H}_0| \neq |\vec{H}_A| \quad (2.22)$$

### 2.11 Sifat Kemagnetan Batuan

Prinsip bahwa benda yang diletakkan dalam magnet akan mempengaruhi medan magnet berlaku juga untuk batuan, sesuai dengan persamaan (Wirasantosa, 1984) :

$$B = \mu H \quad (2.23)$$

Dimana,

**B** : medan magnet induksi dalam (T).

**H** : medan magnet asal dalam (A/m)

**μ** : sifat bahan yang disebut sebagai permeabilitas (N/A<sup>2</sup>)

Dalam suatu edium hampa, permeabilitas mutlak bernilai sama dengan **μ<sub>0</sub>**. Dapat diartikan bahwa gaya medan **H** akan menciptakan kerapatan arus **B<sub>0</sub>=μ<sub>0</sub>H** dalam hampa. Untuk selanjutnya **μ<sub>0</sub>** ditentukan sama dengan  $4\pi \times 10^{-7} \Omega \text{ d/m}$ . Apabila pada satu titik dalam hampa, kerapatan arus sama dengan **B<sub>0</sub>**, sedangkan gaya yang berhubungan ialah **B<sub>0</sub>/μ<sub>0</sub>**. Salah satu sifat dasar kemagnetan yaitu kerentanan (*magnetic susceptibility*, **k**) yang dalam keadaan hampa bernilai **k=0**.

Bahan yang diletakkan dalam medan magnet cenderung untuk mempengaruhi garis gaya magnet dengan berbagai cara, yaitu menarik sedikit atau garis-garis gaya magnet secara lebih rapat. Benda yang menolak medan magnet disebut sebagai diamagnetik, sedangkan benda yang menarik medan magnet disebut sebagai para magnetik. Benda-benda seperti besi nikel dan besi campuran menarik garis gaya medan magnet dengan sangat kuat. Benda yang bersifat seperti itu disebut ferromagnetik. Permeabilitas benda ferromagnetik merupakan fungsi dari medan magnetnya (Wirasantosa, 1984).

Sifat magnetik material pembentukan batuan dapat dibagi menjadi tiga jenis (Telford et al, 1990) :

### 1. Diamagnetik

Dalam batuan diamagnetik atom-atom pembentuk batuan mempunyai kulit elektron berpasangan dan mempunyai spin yang berlawanan dalam tiap pasangan. Jika mendapat medan magnet dari luar orbit, elektron tersebut akan berpresesi yang menghasilkan medan magnet lemah yang melawan medan magnet luar tersebut yang memiliki nilai suseptibilitas negatif dan nilai suseptibilitas tidak tergantung dari medan magnet luar. Contoh : bismuth, grafit, gipsum, marmer, kuarsa, dan garam.

### 2. Paramagnetisme

Di dalam paramagnetisme terdapat kulit elektron terluar yang belum jenuh yaitu ada elektron yang spinnya tidak berpasangan dan mengarah pada arah spin yang sama. Jika terdapat medan magnetik luar, spin tersebut berpresesi menghasilkan medan magnet yang mengarah searah dengan medan magnet tersebut sehingga memperkuatnya. Tetapi momen magnetik yang terbentuk terorientasi acak oleh agitasi termal, oleh karena itu bahan tersebut dapat dikatakan mempunyai sifat : suseptibilitas  $k$  positif dan sedikit lebih besar dari satu. Suseptibilitas  $k$  bergantung pada temperatur. Contoh : piroksen, olivin, garnet, biotit, amfibolit, dll. Dalam benda-benda magnetik atomik permanen, cenderung untuk membantu medan luar, sedangkan untuk dielektrik-dielektrik medan dari dipol-dipol selalu cenderung untuk melawan medan luar, apakah dielektrik mempunyai dipol-dipol yang terinduksi atau diorientasikan.

### 3. Ferromagnetik

Terdapat banyak kulit elektron yang hanya diisi oleh suatu elektron sehingga mudah terinduksi oleh medan luar. Keadaan ini diperkuat lagi oleh adanya kelompok-kelompok bahan ber spin searah yang membentuk dipol-dipol magnet (domain) mempunyai arah sama, apalagi jika didalam medan magnet luar. Ferromagnetik mempunyai sifat : suseptibilitas  $k$  positif dan jauh lebih besar dari satu. Suseptibilitas  $k$  bergantung dari temperatur. Contoh : besi, nikel, kobalt.

Garis gaya magnet dalam suatu benda sebagaimana berasal dari luar benda itu dan sebagaimana yang lain berasal dari benda itu sendiri

yang terpolarisasi. Intensitas medan magnet pada suatu bahan secara umum tergantung pada kuat medan magnet yang diberikan. Hubungan antara intensitas medan magnet pada suatu benda dengan kuat medan yang diberikan dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Wirasantosa, 1984) :

$$I = kH \quad (2.24)$$

Dimana **I** adalah intensitas medan magnet induksi (T), **H** adalah kuat medan magnet (T), dan **k** adalah susceptibilitas.

Susptibilitas magnet pada batuan pada umumnya era kaitanya dengan kandungan mineral dan oksida besi. Nilai suseptibilitas pada batuan akan semakin besar apabila dalam batuan tersebut banya ditemui mineral-mineral yang bersifat magnetik.

Nilai dari suseptibilitas berbeda dengan nilai yang diberikan oleh permeabilitas. Hubungan antara permeabilitas dan suseptibilitas dapat dilihat dipersamaan dibawah :

$$\mu = 1 + 4\pi k \quad (2.25)$$

Dengan  $\mu$  adalah permeabilitas batuan, sedangkan k adalah suseptibilitas batuan. Berdasarkan nilai suseptibilitas (k) tersebut, maka diklasifikasikan beberapa material yang memiliki sifat magnetik. Hal tersebut didasarkan pada bagaimana material itu bereaksi terhadap medan magnet luar (Tipler, 1990).

## 2.12 Suseptibilitas Kemagnetan

Suseptibilitas kemagnetan adalah tingkat suatu benda magnetik untuk mampu termagnetisasi, yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

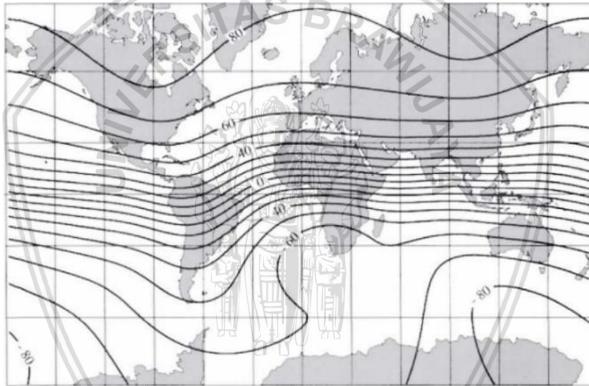
$$k = \frac{\vec{I}}{H} \quad (2.26)$$

Dengan  $\vec{I}$  adalah intensits magnetisasi dan  $\vec{H}$  adalah kuat medan magnet.

Besaran tak berdimensi inilah yang merupakan parameter dasar yang dipergunakan dalam metode magnetik.

### 2.13 Medan Magnet Bumi

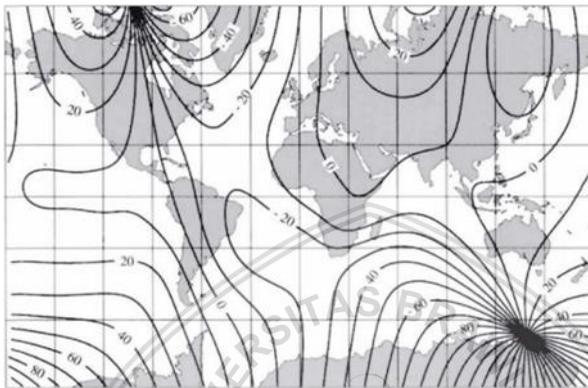
Bumi dapat dipandang sebagai suatu benda magnet besar yang bersifat dipole, dengan sumbu magnetik yang tidak berimpit dengan sumbu geografis bumi. Sumbu magnetik membentuk  $\pm 11,5$  derajat dengan sumbu perputaran bumi. Sumbu-sumbu dipole bila diperpanjang akan menembus permukaan bumi pada dua titik, yaitu di utara terletak pada  $78,5^\circ \text{ N } 70^\circ \text{ W}$  (sebelah barat Greenland) dan di selatan terletak pada  $78,5^\circ \text{ S } 110^\circ \text{ E}$  (di Antartika). Garis fiktif pada permukaan bumi yang terletak ditengah-tengah antara dua kutub disebut sebagai ekuator geomagnet, yang harus dibedakan dari ekuator magnetik yang didefinisikan sebagai garis penghubung kutub utara magnet bumi (Wirasantosa, 1984).



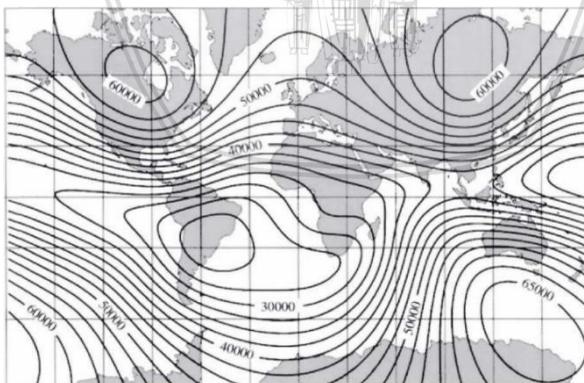
**Gambar 2.11** Peta Isoklinik yang menunjukkan inklinasi konstan, interval kontur  $10^\circ$ , berdasarkan IGRF 1990 (Blakely, 1957).

Jarum magnet pada permukaan bumi akan bebas berputar dan mengorientasikan dirinya sesuai dengan arah medan magnet ditempat tersebut. Sudut yang dibentuk antara jarum magnet dengan garis mendatar disebut dengan sudut inklinasi, sedangkan sudut yang dibentuk antara garis utara geografis dengan garis utara magnetik disebut deklinasi. Gambar 2.11 menunjukkan peta isoklinik yaitu garis-garis yang menghubungkan antar tempat yang mempunyai inklinasi yang sama.

Garis yang menghubungkan titik-titik yang memiliki deklinasi yang sama disebut garis isogonik yang ditunjukkan gambar 2.12. Garis isodinamik adalah garis yang dibentuk dengan cara menghubungkan tempat-tempat dengan intensitas yang sama, seperti di ilustrasikan pada gambar 2.13.



**Gambar 2.12** Peta Isogonik yang menunjukkan deklinasi konstan, interval kontur  $10^\circ$ , berdasarkan IGRF 1990 (Blakely, 1995).



**Gambar 2.13** Peta Isodinamik yang menunjukkan intensitas total, interval kontur 2.500 nT, berdasarkan IGRF 1990 (Blakely, 1995).

### 2.13.1. Medan Magnet Utama

Medan magnet utama secara teori diakibatkan oleh sumber yang ada didalam bumi, magnetisasi permanen oleh aliran arus listrik atau arus listrik yang keluar dan masuk ke bumi. Beberapa teori menganggap inti bumi tersusun oleh besi dan nikel, dua materi yang dikenal sebagai konduktor yang sangat baik. Penyusun inti bumi, sumber magnetik merupakan dinamo berkonduktivitas tinggi dan bergerak dengan mekanisme yang kompleks, seperti arus atau senyawa kimia dan variasi thermal beserta alirannya. Kombinasi gerak dan arus tersebut disebabkan terjadinya medan magnet (Telford et al, 1990).

### 2.13.2. Medan Magnet Luar

Medan magnet luar merupakan sebagian kecil dari medan utama, yaitu hanya 1% dari medan magnet bumi dan berasal dari luar bumi. Medan ini berhubungan dengan arus listrik yang mengalir pada lapisan terionisasi yang terletak diatas lapisan atmosfer bumi. Perbedaan waktu untuk medan ini lebih cepat daripada medan utama, beberapa efek yang ditimbulkan yaitu :

- Perputarannya berdurasi 11 tahun dan berkorelasi dengan aktifitas matahari
- Variasi diurnal matahari mempunyai periode 24 jam dan mempunyai rentang 30 nT dan berubah menurut garis lintang dan musim yang kemungkinan dipengaruhi oleh aktifitas matahari pada lapisan ionosfer.
- Mempunyai periode 25 jam (variasi diurnal bulan) dengan rentang sekitar 2 nT, yang diasosiasikan dengan interaksi bulan dengan ionosfer.
- Acak yaitu badai magnetik yang merupakan gangguan transient dengan amplitudo sebesar 1000 nT pada semua garis lintang. Pada puncak badai magnetik, otomatis eksplorasi dengan metode magnetik sangat tidak efektif (Telford et al, 1990).

### 2.13.3. Anomali Medan Magnet

Anomali medan magnet sering juga disebut medan magnet lokal. Medan magnet ini dihasilkan oleh batuan yang mengandung mineral bermagnet seperti magnetit ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), titanomagnetit ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ), dan lain-lain yang berada di kerak bumi.

Dalam survei dengan metode magnetik yang menjadi target dari pengukuran adalah variasi medan magnetik yang terukur di permukaan (anomali magnetik). Secara garis besar anomali medan magnetik disebabkan oleh medan magnetik remanen dan induksi. Medan magnet remanen mempunyai peranan yang besar terhadap magnetisasi batuan yaitu pada besar dan arah medan magnetiknya serta berkaitan dengan peristiwa kemagnetan sebelumnya sehingga sangat rumit untuk diamati. Anomali yang diperoleh dari survei merupakan hasil gabungan medan magnetik remanen dan induksi, bila arah medan magnet remanen sama dengan arah medan magnet induksi, maka anomalnya bertambah besar. Demikian pula sebaliknya, dalam survei magnetik, efek medan remanen akan diabaikan apabila anomali medan magnetik kurang dari 25% medan magnet utama bumi (Telford et al, 1990), sehingga dalam pengukuran medan magnet berlaku :

$$\vec{H}_T = \vec{H}_0 + \vec{H}_L + \vec{H}_A \quad (2.27)$$

Dengan :

- $\vec{H}_T$  : medan magnet total bumi
- $\vec{H}_0$  : medan magnet utama bumi
- $\vec{H}_L$  : medan magnet luar
- $\vec{H}_A$  : medan magnet anomali

## 2.14 Koreksi Metode Magnetik

### 2.14.1. Koreksi Diurnal (harian)

Koreksi diurnal ialah penyimpangan intensitas medan magnet bumi yang disebabkan oleh adanya perbedaan waktu pengukuran dan efek sinar matahari dalam satu hari. Koreksi ini dapat diketahui dengan menghitung variasi intensitas medan magnet total pada *base station* dikurangi dengan harga awal pengukuran (interpretasi linear terhadap waktu), dengan persamaan seperti berikut (Lesmana, 2007) :

$$HD = \frac{(tn-taw)}{(tak-taw)} (Hak - Haw) \tag{2.28}$$

Dimana:

$t_n$  : waktu pada titik n

$t_{aw}$  : wktu awal

$t_{ak}$  : waktu akhir

$H_{ak}$  : Nili medan magnet di titik akhir

$H_{aw}$  : Nilai medan magnet di titik awal

### 2.14.2. Koreksi IGRF

Pengukuran medan magnet total pada dasarnya merupakan sumbangan dari tiga komponen dasar medan magnet, yaitu medan utama, medan luar, dan medan anomali. Medan utama merupakan harga rata-rata intensitas medan magnet daerah pengukuran. Dari ketiga komponen dasar harga intensitas medan magnet tersebut dapat diperoleh hubungan sebagai berikut (Lesmana, 2007) :

$$\Delta H = H - HD - Ho \tag{2.29}$$

Dimana :

$\Delta H$  : Anomali intensitas medan magnet

$H$  : Intensitas medan magnet terukur

$H_D$  : Intensitas medan magnet pengaruh luar

$H_o$  : Intensitas medan magnet utama bumi (IGRF)

### 2.14.3. Pemfilteran dengan *Butterworth*

Proses ini merupakan langkah yang mengubah data medan potensial yang diukur pada suatu level permukaan, menjadi data yang seolah-olah diukur pada level permukaan lebih atas. Proses ini merupakan suatu metode yang sering digunakan untuk menghilangkan *noise* yang ditimbulkan oleh benda-benda pada dekat permukaan. Dan dapat digunakan untuk mengurangi efek dari sumber dari anomali dangkal (Satiawan, 2009).

Filter ini konsepnya tidak jauh berbeda dengan kontinuitas ke atas, dimana konsep dasar kontinuitas ke atas didapatkan dari teorema Green, dimana teori ini menjelaskan bahwa fungsi U merupakan harmonik, berkelanjutan, dan mempunyai turunan yang kontinu di sepanjang daerah R (Gambar 2.14). Maka nilai U pada titik P dalam daerah R diperoleh sebagai berikut (Blakely, 1957) :



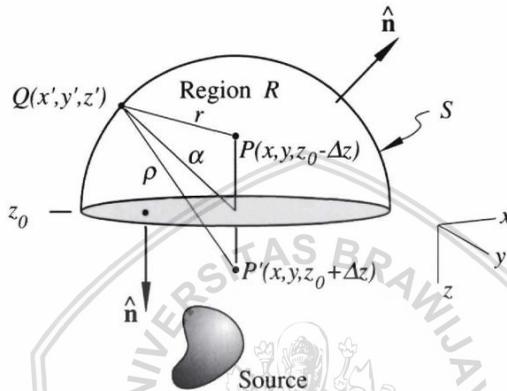
$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} dS \quad (2.30)$$

Dimana :

**s** : menunjukkan permukaan daerah R

**n** : arah normal keluar

**r** : jarak dari titik P ke titik pada permukaan S

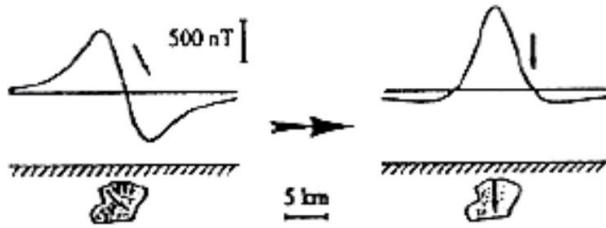


**Gambar 2.14** Prinsip kontinuitas ke atas dari permukaan horizontal (Blakely, 1957).

Kontinuitas ke atas digunakan untuk menghilangkan pengaruh lokal yang masih terdapat pada data dan mencari pengaruh dari anomali regionalnya (Wahyudi, 2004).

#### 2.14.4. Reduksi ke Kutub Magnet

Reduksi ke kutub merupakan salah satu filter pengolahan data magnetik untuk menghilangkan pengaruh sudut inklinasi magnetik. Filter ini dibutuhkan karena sifat dipol anomali magnetik menyulitkan interpretasi data lapangan yang umumnya masih berpola asimetrik. Reduksi ke kutub digunakan untuk menyederhanakan interpretasi data medan magnetik pada daerah-daerah berlintang rendah dan menengah (Blakely, 1957).



**Gambar 2.15** Anomali magnetik dan anomali hasil reduksi ke kutub (Blakely, 1957).

Hasil dari reduksi ke kutub menunjukkan anomali magnetik menjadi satu kutub. Hal ini ditafsirkan posisi benda penyebab anomali medan magnet berada dibawahnya seperti gambar 2.15.

#### 2.14.5. Koreksi Efek Regional

Data anomali magnetik yang menjadi target survei selalu bersuperposisi atau bercampur dengan anomali magnetik lain yang berasal dari sumber yang sangat dalam dan luas di bawah permukaan bumi. Anomali magnetik ini disebut sebagai anomali magnetik regional (Breiner, 1973).

Oleh karena itu untuk menginterpretasi anomali medan magnetik, maka dilakukan koreksi efek regional yang bertujuan untuk menghilangkan efek anomali magnetik regional dari data anomali medan magnetik hasil akuisisi (Blakely, 1996).

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini mencakup daerah seluas 10.500 Ha. Dengan batas koordinat geografis antara 582.744 – 596.569 mE dan 9.170.881 – 9.184.726 mS pada sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* WGS 84 zona 49 *Southern* yang terletak di kompleks gunung Pandan. Secara administratif lokasi penelitian terletak di Kabupaten Madiun, Nganjuk, dan Bojonegoro, Provinsi Jawa Timur. Sedangkan untuk penelitian secara keseluruhan dilaksanakan pada bulan April sampai Juli 2018 di Laboratorium Geofisika, Universitas Brawijaya Malang.

### 3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Jawa Timur. Adapun pada penelitian ini data yang digunakan sebagai input data yaitu nilai magnetik di tiap titik akuisisi yang dilakukan pada tanggal 24 sampai 29 September 2012 dan hasil laboratorium kandungan kimia manifestasi yang kemudian diolah untuk menentukan letak, suhu, dan kandungan pada reservoir. Selanjutnya dilakukan pengolahan untuk memudahkan proses interpretasi.

#### 3.2.1 Data Anomali Medan Magnet

Data Anomali medan magnet yang digunakan untuk pengolahan dihasilkan dari pengukuran dengan alat PPM model G-856. Akuisisi dilakukan dengan cara acak atau dengan sistem Grid dengan interval antar titik sekitar 500-2000 m.

#### 3.2.2 Kandungan Kimia Fluida Reservoir

Data yang digunakan untuk pengolahan geokimia yaitu data analisis kimia fluida air panas. Fluida yang di analisis yaitu fluida berupa air panas yang muncul di manifestasi Desa Jari dan Desa Banyukuning.

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Pengolahan Data Magnetik

Pengolahan Data dimulai dengan melakukan koreksi Diurnal dan IGRF untuk mendapatkan nilai anomali medan magnet total dengan menginput data ke Microsoft Excel. Selanjutnya melakukan pemodelan dua dimensi dan inversi tiga dimensi menggunakan software Oasis Montaj 8.3.

##### 3.3.1.1 Koreksi Harian

Dilakukan untuk menghilangkan efek medan magnetik yang berasal dari luar. Koreksi ini dapat diperoleh dengan mengurangi nilai intensitas medan magnet pada tiap titik pengukuran dengan nilai intensitas magnet pada *base station*.

##### 3.3.1.2 Koreksi IGRF

Pengolahan koreksi IGRF dilakukan menggunakan bantuan *software Ms Excel*. Hasil dari koreksi ini akan diperoleh anomali medan magnet total yang kemudian dibuat peta kontur anomali menggunakan *software Oasis Montaj*.

##### 3.3.1.3 Reduksi ke Kutub

Reduksi ke kutub dilakukan untuk melakukan interpretasi secara kualitatif. Proses ini dilakukan dengan cara membuat sudut inklinasi benda menjadi  $90^\circ$  dan deklinasinya  $0^\circ$ .

##### 3.3.1.4 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

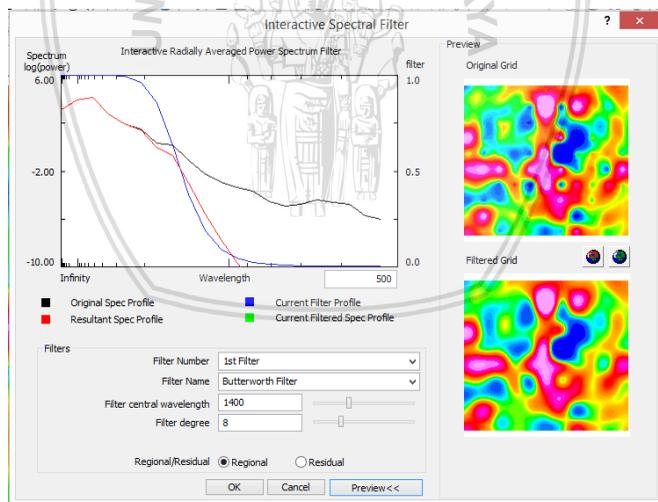
Pemisahan anomali regional dengan residual merupakan tahapan yang sangat dibutuhkan pada data magnetik. Pemisahan anomali ini disebut juga koreksi efek regional. Besar anomali magnetik total hasil akuisisi terdiri dari dua komponen yang saling bersuperposisi yaitu komponen anomali regional dan anomali residual. Data anomali medan magnet yang menjadi target survei selalu bersuperposisi dengan anomali medan magnet lain yang bersumber sangat dalam dan luas di bawah permukaan yang disebut dengan anomali magnet regional. Untuk melakukan interpretasi anomali medan magnetik yang menjadi target survei dengan tujuan untuk menghilangkan efek anomali regional dari data anomali magnet total.

### 3.3.1.5 Pemfilteran Butterworth

Langkah ini dilakukan untuk memisahkan anomali regional dengan anomali residual yang menjadi target survei. Anomali regional ini berhubungan dengan kondisi geologi umum yang dominan didaerah akuisisi yang dicirikan dengan anomali berfrekuensi rendah. Sedangkan anomali residual mengandung informasi geologi daerah akuisisi. Data yang telah dikoreksi selanjutnya dibuatkan peta kontur yang berupa peta kontur anomali medan magnet total, peta kontur anomali total yang telah direduksi ke kutub serta peta kontur anomali regional, dan anomali lokal yang menjadi target survei dengan bantuan *Software Oasis Montaj 8.3*.

*Butterworth* filter merupakan filter yang dapat diterapkan pada *highpass* filter dan *lowpass* filter. Kelebihan filter ini yaitu tidak adanya pemotongan sinyal, melainkan pelemahan sinyal secara bertahap.

Proses filter yang ditunjukkan oleh gambar 3.1 berfungsi untuk menghilangkan atau mengurangi efek dari sumber magnetik yang tersebar di permukaan.



**Gambar 3.1** *Butterworth filter* untuk memperoleh anomali regional

### 3.3.1.6 Pemodelan

Data geofisika yang didapatkan dari hasil akuisisi mewakili suatu besaran fisis tertentu dari suatu kondisi geologi di bawah permukaan. Data geofisika diharapkan dapat menginformasikan parameter fisis dari suatu benda di bawah permukaan. Informasi tersebut dapat diperoleh jika diketahui hubungan antara sifat fisis dan data geofisika. Suatu model geofisika merupakan representasi keadaan geologi di bawah permukaan dengan besaran fisis dan geometri tertentu. Pemodelan ada dua jenis yaitu *Forward* dan *Inverse*.

*Forward modelling* merupakan langkah perhitungan respon dari model berdasarkan parameter model dari suatu model tertentu. Dalam pemodelan ini dicari model dengan parameter model yang sesuai hingga memberikan hasil yang cocok antara data teoritis dengan data akuisisi. Karena itu dilakukan proses *trial and error* hingga diperoleh data yang paling akurat.

*Inverse modelling* merupakan langkah perhitungan parameter model dari suatu data akuisisi. Perhitungan ini menggunakan model matematika yang diturunkan dari konsep fisika. Skema pemodelan ini sama seperti pada forward, bedanya dilakukan proses perubahan parameter model agar diperoleh kecocokan antara data perhitungan dengan data akuisisi. Pemodelan inversi sering disebut sebagai data fitting karena dalam prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respon yang pas dengan data pengukuran di lapangan.

### 3.3.2 Pengolahan Data Geokimia

Data geokimia yang ada merupakan data yang didapat melalui analisa Laboratorium. Hal awal yang dapat diketahui yaitu kualitas air manifestasi yang akan dipergunakan untuk analisa kimia air. Hal tersebut dapat diketahui menggunakan metode kesetimbangan ion atau *Ion Balance*, data dapat dikatakan baik apabila nilai kesetimbangan antara kation dan anion tidak lebih dari 5% (Nicholson, 1993).

Selanjutnya dilakukan pengeplotan ke dalam diagram segitiga  $Cl-SO_4-HCO_3$ . Hasil pengeplotan akan mencerminkan kisaran komposisi daripada jenis air yang berbeda yang biasanya ditemukan di daerah panas bumi seperti *Mature NaCl Waters* dengan

pH netral, Na-HCO<sub>3</sub> waters, yang mengindikasikan *Peripheral Waters*, dan *Volcanic and Steam Heated Waters* yang merupakan akibat adanya penyerapan kedalam air tanah.

Setelah itu dicari kesetimbangan unsur kimia air batuan atau *Water Rock Equilibrium* dengan dilakukan plot ke dalam diagram Na-K-Mg. Dari diagram tersebut dapat diketahui pula besar temperatur reservoir dengan mengacu pada *Weir Box* yang didasari dari Geotermometer Na-K dan K-Mg Giggenbach. Diagram ini merupakan *Geoindikator* dimana dapat mengilustrasikan bukti yang mendukung interpretasi kesetimbangan air pada temperatur yang tinggi namun juga dapat menginterpretasikan pengaruh proses dangkal dan kemungkinan kesetimbangan di temperatur yang rendah.

Untuk mengetahui asal fluida mengalir dari batuan apa yang dominan dilalui air manifestasi dapat diketahui dengan melakukan plot ke diagram Cl-Li-B.

Perhitungan Geotermometer dilakukan untuk mendapatkan nilai dari temperatur reservoir dengan menggunakan geotermometer silika, Na-K, dan K-Mg. Geotermometer Na-K memiliki tingkat ketelitian lebih besar (Fournier, 1979b) dikarenakan laju kesetimbangan lebih lambat daripada proses pelarutan dan pengendapan larutan silika dan pertukaran kesetimbangan K-Mg. Geotermometer kuarsa baik digunakan untuk kondisi reservoir di atas 150 °C. Dibawah temperatur tersebut geotermometer kalsedon lebih baik untuk digunakan.

Geotermometer Na-K Mampu mengindikasikan temperatur bawah permukaan yang lebih tinggi pada kedalaman yang lebih dalam karena kurang terpengaruh oleh *dilusi* dan *boiling* oleh silika (Nicholson, 1993). Sedangkan untuk geotermometer K-Mg dianggap mewakili kondisi terakhir reaksi kimiawi batuan sekitar dengan fluida ketika terjadi *discharge*.

### 3.3.3 Interpretasi Data Magnetik

Pada tahap ini hasil penelitian diterjemahkan untuk selanjutnya diketahui bagaimana gambaran kondisi bawah permukaan daerah yang diteliti. Interpretasi data magnetik dibagi menjadi dua, yaitu secara kuantitatif dan kualitatif.

### 3.3.3.1 Interpretasi Kualitatif

Interpretasi kualitatif didasarkan pada pola kontur anomali medan magnetik yang bersumber dari distribusi benda-benda yang termagnetisasi atau bisa juga struktur geologi bawah permukaan bumi. Interpretasi ini dilakukan dengan melakukan analisa peta kontur anomali medan magnetik lokal dengan hasil yang diperoleh berupa lokasi penyebab anomali medan magnetik berdasarkan kontur.

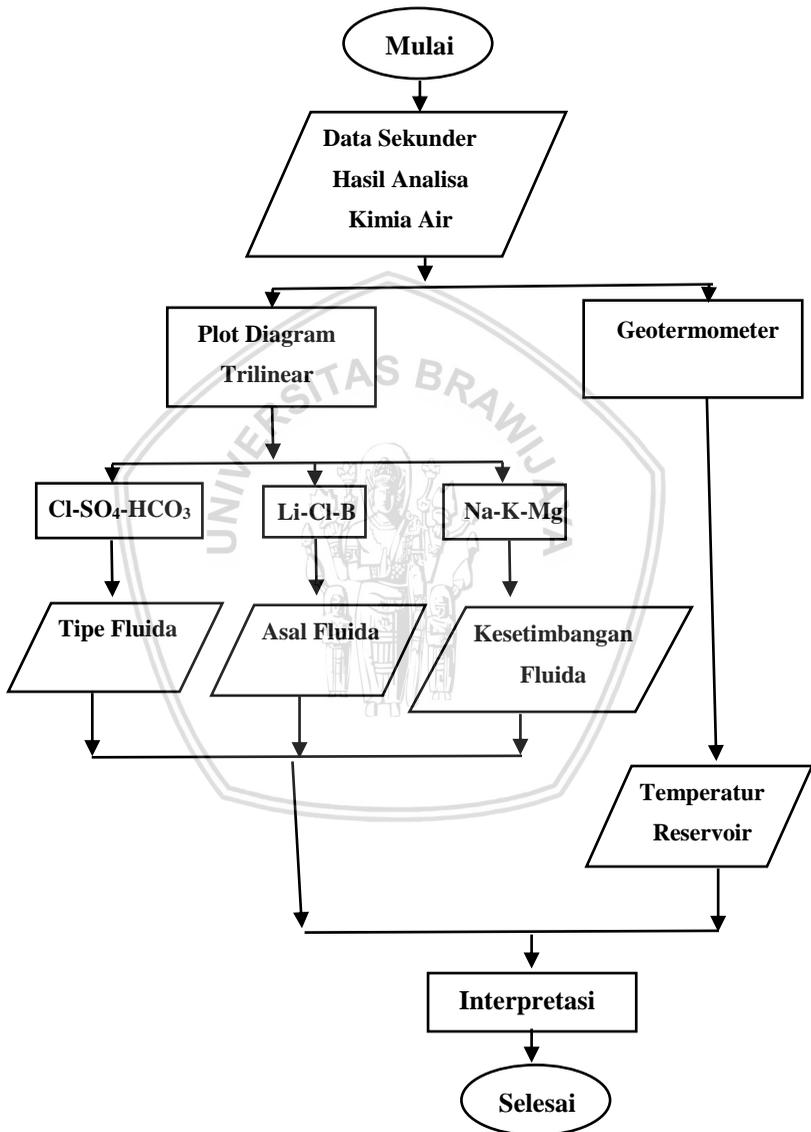
### 3.3.3.2 Interpretasi Kuantitatif

Interpretasi kuantitatif bertujuan untuk menentukan bentuk dan kedalaman benda anomali atau struktur geologi melalui pemodelan. Prinsip kerja dari program *GmSys* yaitu menyamakan bentuk dari anomali pengamatan (berupa garis putus-putus) dengan anomali perhitungan.

Interpretasi ini dilakukan berdasarkan hasil penafsiran kualitatif sehingga dapat menentukan bagian-bagian penampang anomali yang menarik untuk selanjutnya dilakukan perkiraan struktur geologi bawah permukaan. Namun dalam interpretasi ini terdapat ambiguitas yang disebabkan beragamnya model yang dapat dihasilkan karena adanya parameter suseptibilitas dari kedalaman yang tidak pasti, sehingga diperlukan data pendukung berupa data geologi daerah penelitian dan data suseptibilitas batuan.

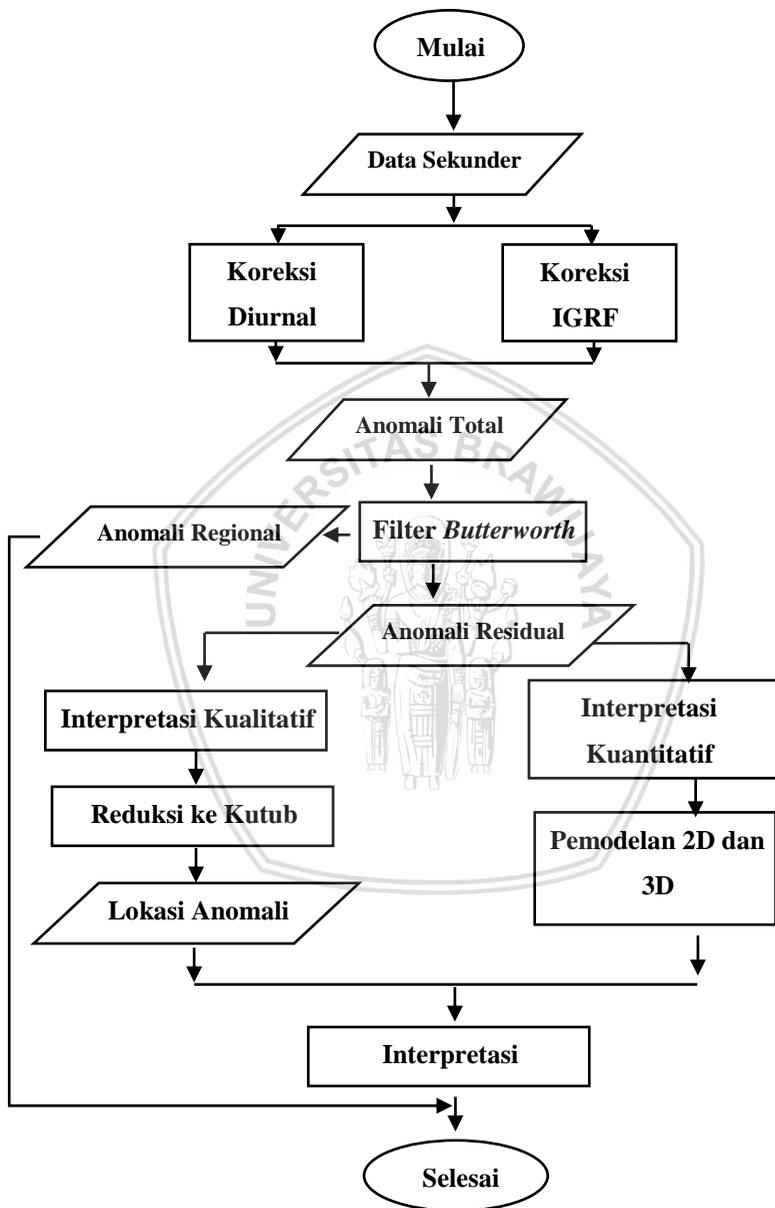
### 3.4 Diagram Alir Penelitian

#### 3.4.1 Diagram Pengolahan Data Geokimia



Gambar 3.2 Diagram Alir Metode Magnetik

### 3.4.2 Diagram Pengolahan Data Magnetik



Gambar 3.3 Diagram Alir Metode Geokimia

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Manifestasi Daerah Panas bumi Gunung Pandan

Adanya suatu potensi energi panas bumi di suatu wilayah ditandai dengan adanya tanda-tanda kenampakan atau manifestasi. Manifestasi permukaan panas bumi adalah segala bentuk gejala sebagai hasil dari proses sistem panas bumi tersebut (Sumintadireja, 2005). Manifestasi permukaan biasanya memiliki luas kenampakan yang bervariasi dan dapat dijadikan cerminan kondisi reservoir dibawahnya.

Keterdapatan potensi panas bumi di daerah survei ditandai dengan adanya beberapa manifestasi air panas. Mata air hangat di Desa Jari yang keluar dimanfaatkan untuk beberapa keperluan oleh warga sekitar. Mata air panas Jari 1 (MAPJR1) elevasi 207 (mdpl), memiliki suhu air 40 C dan ph 6,21 yang dimanfaatkan sebagai tempat mandi atau berendam. Mata air panas Jari 2 (MAPJR2) elevasi 207 (mdpl) memiliki suhu air 35,4 C dengan ph 6,39 dimanfaatkan sebagai pengairan. Sedangkan pada mata air panas Jari 3 (MAPJR3) elevasi 212 (mdpl) dimanfaatkan sebagai pengairan juga dengan nilai suhu air 43,1 C dan ph nya 6,39.

Daerah manifestasi selanjutnya berada di Desa Banyukuning. Ada tiga titik munculnya manifestasi yang digunakan sebagai bahan analisa yaitu Mata air panas Banyukuning (MAPBKN) 1, 2, dan 4. Suhu air terendah 33,1 C dan tertinggi 36,7 C. Ph air pada mata air 1, 2, dan 4 berturut turut yaitu 6,28; 6,57; dan 6,35. Mata air ini dimanfaatkan warga sebagai tempat pemandian. Untuk elevasinya berturut turut dari mata air 1,2, dan 4 yaitu 486, 491, dan 490 (mdpl).

### 4.2 Analisa Magnetik Wilayah Panasbumi Gunung Pandan

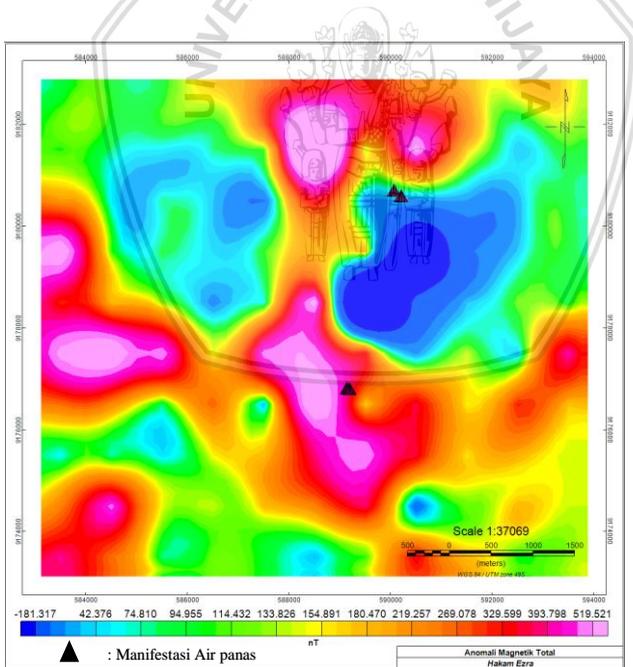
Berdasarkan data dari intensitas magnet, waktu pengambilan, ketinggian titik, dan posisi titik pengambilan data yang kemudian dilakukan koreksi diurnal dan koreksi IGRF menggunakan *Software Microsoft Excel*, pemfilteran menggunakan *Butterworth*, transformasi reduksi ke kutub. Selanjutnya dari anomali residual dilakukan pemodelan *Forward* dan *Inversi* menggunakan *Software Oasis Montaj 8.3* dengan mengacu pada struktur geologi wilayah setempat.

### 4.2.1 Anomali Magnetik Total

Apabila nilai anomali magnetik total sudah didapat, maka dapat diketahui bentuk peta kontur anomali medan magnet total seperti pada gambar 4.1. Berdasarkan peta tersebut dapat diketahui variasi nilai anomali magnetik total dari skala warna, yaitu nilai minimum sebesar -181,317 nT hingga maksimumnya 519,521 nT.

Anomali magnetik rendah berada pada wilayah barat daya – timur laut yang berada di sekitar bagian tengah daerah survei yang berada disekitar kompleks manifestasi Jari dengan nilai magnetik -181,37 sampai 74,810 nT. Sebagaian dari wilayah survei juga mempunyai nilai anomali magnetik tinggi dengan nilai 300 sampai 500 nT yang dijumpai di bagian utara, barat, dan selatan.

Perbedaan nilai anomali magnet total yang muncul disebabkan adanya perbedaan kandungan mineral batuan. Untuk nilai anomali magnetik rendah dimungkinkan muncul karena adanya batuan alterasi dan aktifitas panas dibawah permukaan.

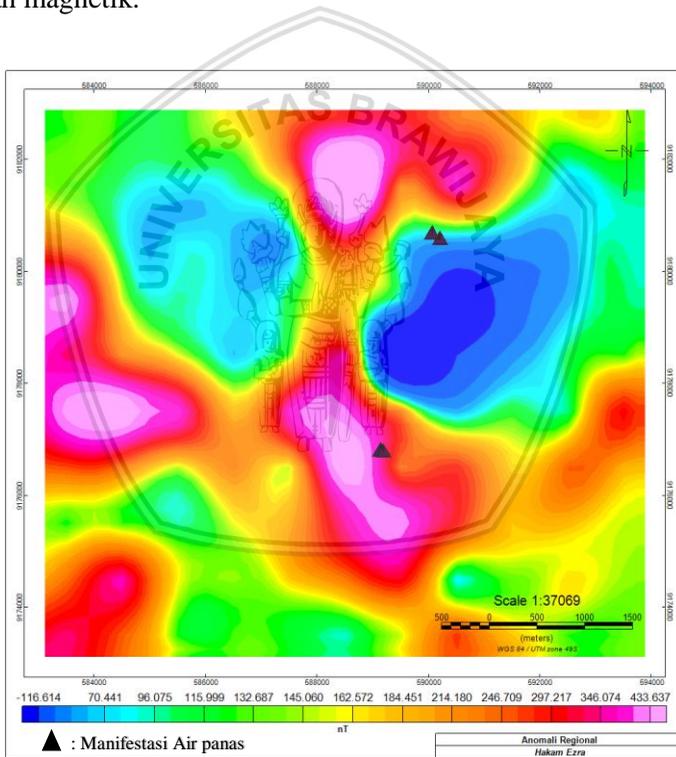


**Gambar 4.1** Kontur anomali magnetik total

#### 4.4.2 Anomali Regional

Anomali regional merupakan anomali magnet total yang dilakukan proses pem-filter-an menggunakan filter *Butterworth*. Metode filter frekuensi diawali dengan mentransformasikan data yang berupa data spasial menjadi data frekuensi.

Gambar 4.2 merupakan peta kontur anomali magnetik total setelah dilakukan filter *Butterworth* yang mempertlihatkan kenampakan berupa peta anomali magnetik regional. Pada peta tersebut terlihat terjadi perubahan dibandingkan pada peta anomali magnetik total, yaitu semakin mengelompoknya anomali. Terlihat kompleks manifestasi air panas Jari berada di batas terluar anomali rendah magnetik.



Gambar 4.2 Anomali regional

### 4.2.3 Interpretasi Kualitatif

Interpretasi kualitatif dilakukan untuk mendapatkan pola persebaran anomali magnetik dan mengelompokkan daerah anomali yang rendah, sedang, dan tinggi. Anomali magnetik total dapat diperoleh dengan melakukan koreksi diurnal yang dilakukan untuk mengurangi pengaruh matahari dalam proses pengambilan data. Selanjutnya dilakukan koreksi IGRF yang berguna untuk menghilangkan efek dari medan magnet inti bumi dengan menggunakan nilai IGRF 44600 nT, inklinasi  $-30^\circ$  dan deklinasi  $0,5^\circ$ .

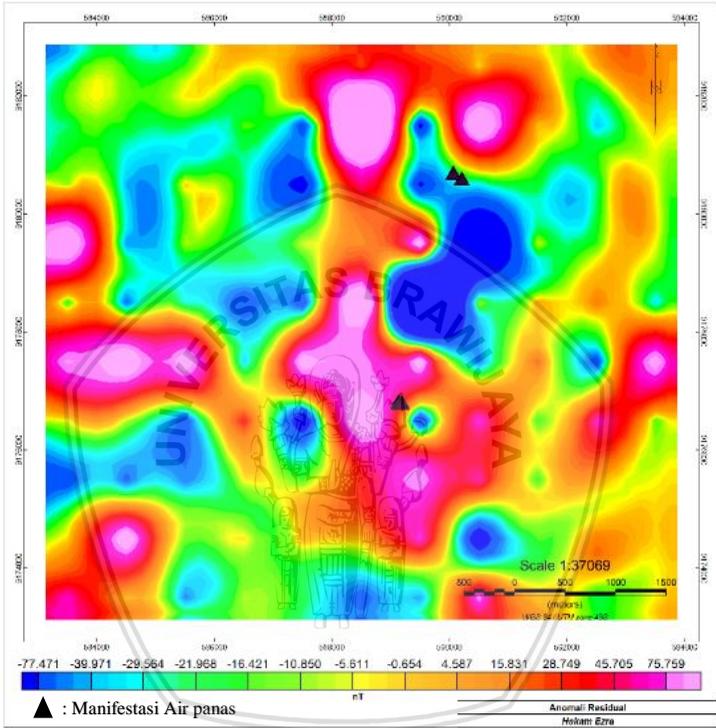
Intensitas magnetik total yang didapatkan dari akuisisi merupakan gabungan dua komponen yaitu anomali regional dan residual. Anomali Residual menunjukkan informasi sumber anomali pada kedalaman yang dekat dengan permukaan bumi, sedangkan anomali regional memberikan informasi tentang sumber anomali pada kedalaman yang tinggi. Untuk mendapatkan nilai anomali magnetik residual dapat dilakukan dengan mengurangi anomali magnetik total dengan anomali regional. Guna memudahkan dalam proses interpretasi, perlu dilakukan proses Reduksi ke Kutub terhadap anomali residual karena membantu dalam mengelompokkan anomali.

#### 4.2.3.1 Anomali Residual

Peta kontur anomali residual seperti ditunjukkan gambar 4.3 diperoleh dari hasil anomali magnetik total dikurangi dengan anomali regional. Pada anomali ini terlihat bahwa manifestasi air panas Banyukuning berada diatas area dengan anomali magnetik tinggi dan sebelah timurnya terdapat area kecil yang bernilai anomali magnetik rendah, sekitar  $-70$  sampai  $-5$  nT. Sedangkan manifestasi mata air panas Jari berada pada area yang lebih luas anomali magnetik rendahnya dibandingkan kompleks manifestasi Banyukuning.

Dalam survei bidang panas bumi, nilai magnet yang digunakan sebagai acuan yaitu nilai magnet rendah atau negatif, dikarenakan anomali rendah berhubungan dengan batuan yang bersifat non magnetik. Batuan dapat bersifat non magnetik diakibatkan adanya proses demagnetisasi batuan atau hilangnya sifat kemagnetan batuan yang disebabkan adanya pemanasan yang dihasilkan dari suatu wilayah panas bumi.

Berdasarkan peta kontur anomali residual gambar 4.3 dapat diketahui bahwa manifestasi air panas Jari dan Banyukuning berada diatas daerah yang terdapat aktifitas panas yang dihasilkan dari sistem panas bumi dibawah permukaanya.



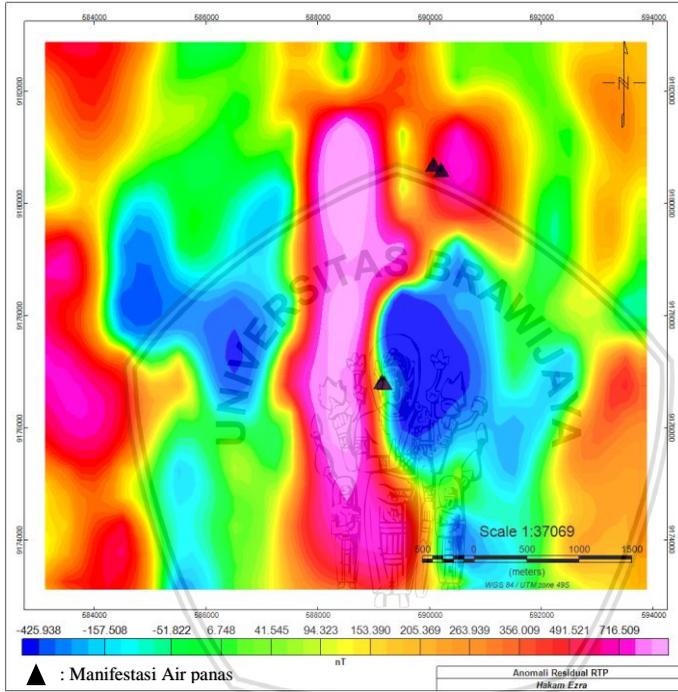
**Gambar 4.3** Peta kontur anomali residual

#### 4.2.3.2 Reduksi ke Kutub

Proses reduksi ke kutub dilakukan untuk mengubah data survei magnetik yang berupa *dipole* magnetik dimana adanya sebuah pasangan positif, diubah bentuknya menjadi *monopole*.

Peta kontur reduksi ke kutub pada gambar 4.4 memperlihatkan nilai anomali magnetik tinggi berarah utara selatan yang terletak di tengah wilayah survei. Sedangkan di sebelah barat

dan timur terdapat anomali magnetik tereduksi ke kutub yang rendah, bernilai sekitar -400 sampai -200 nT. Anomali tinggi yang terdapat memanjang di tengah mempertegas keberadaan sebuah anomali magnetik rendah yang berasosiasi dengan aktifitas panas bumi yang terdiri dari dua kelompok, yaitu kelompok di barat dan timur anomali tinggi.



**Gambar 4.4** Peta kontur anomali residual reduksi ke kutub

#### 4.2.4 Interpretasi Kuantitatif

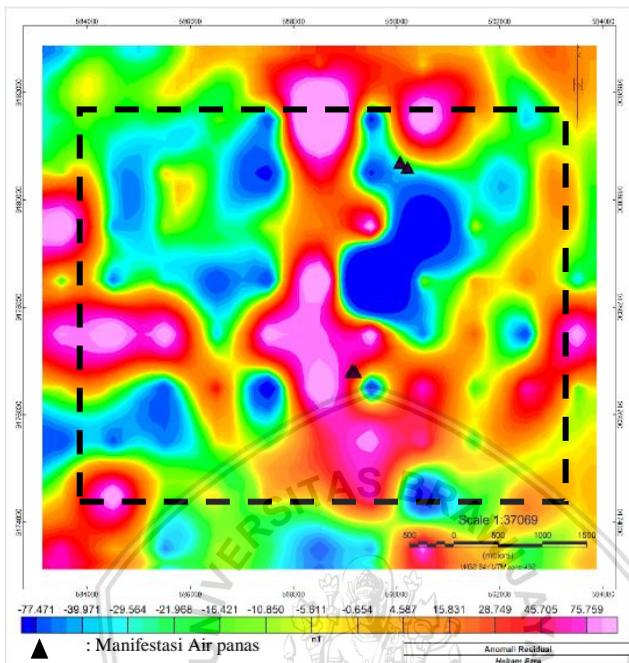
Interpretasi kuantitatif dilakukan dengan melakukan pemodelan menggunakan *software Oasis Montaj 8.3*. Untuk pemodelan *forward* menggunakan *GMSys* sedangkan pemodelan *inversi* menggunakan *Voxi*. Interpretasi kuantitatif dilakukan dengan memodelkan hasil *cross section* pada daerah yang diduga dibawahnya terdapat reservoir panas bumi dari kontur anomali residual magnetik.

Pemodelan dengan *Forward modelling* dilakukan dengan membuat *polygon* terlebih dahulu dan parameternya serta bentuknya diubah dengan cara *trial and error* hingga didapatkan kesesuaian antara garis putus-putus hitam tebal yang merupakan kurva anomali magnetik dengan garis hitam utuh yang merupakan kurva pemodelan. Nilai suseptibilitas yang diinputkan kemudian dicocokkan dengan tabel suseptibilitas batuan untuk penentuan jenis batuanya.

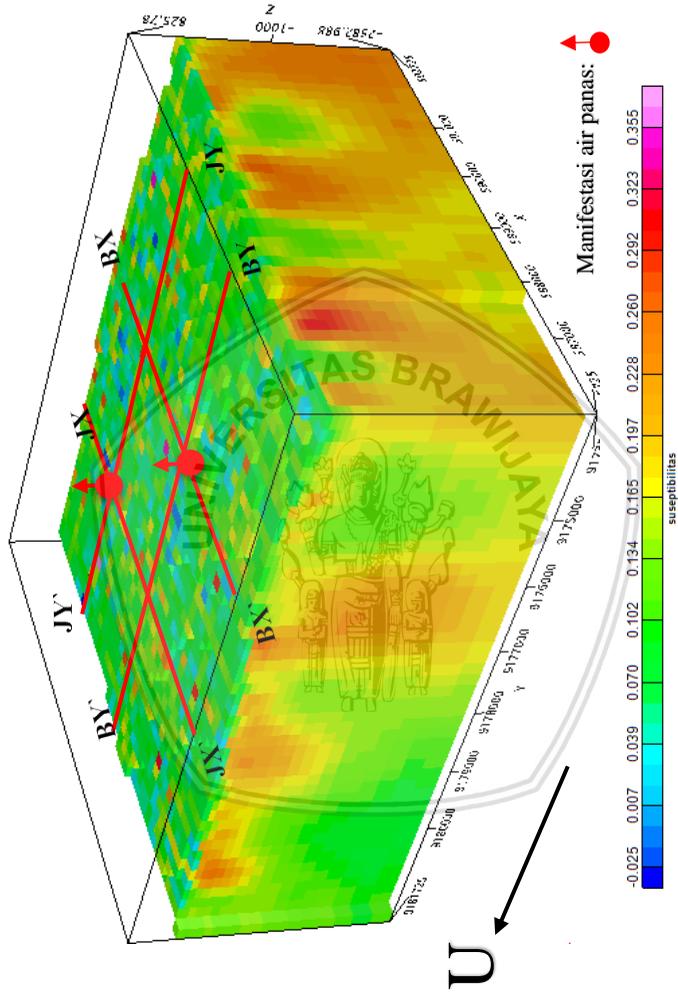
#### 4.2.4.1 Pemodelan Inversi

Pemodelan secara inversi dilakukan terhadap peta kontur anomali magnetik residual seperti ditunjukkan oleh gambar 4.5 dimana inversi dilakukan pada bagian dalam dari kotak dengan garis putus-putus yang bertujuan untuk mendapatkan persebaran nilai suseptibilitas bawah permukaan daerah survei. Pemodelan ini dilakukan pada luasan wilayah sebesar 54 km<sup>2</sup> dengan kedalaman sekitar 2500 m di bawah permukaan tanah. Gambar tiga dimensi disusun dari gabungan piksel dengan ukuran tiap piksel 50x50 m.

Hasil dari pemodelan memiliki rentang suseptibilitas sebesar -0,01 sampai 0,355 (gambar 4.6). Berdasarkan hasil pemodelan tampak didominasi oleh nilai magnetik tinggi dengan rentang nilai sekitar 0,1 sampai 0,5 emu dan muncul sebuah anomali nilai magnetik rendah pada kemenerusan manifestasi dengan nilai -0,024 sampai 0,4. Dari model tiga dimensi kemudian dilakukan pemotongan atau *slicing* yang memotong manifestasi. Analisa terhadap hasil pemodelan inversi dilakukan dengan cara membuat masing-masing dua pemotongan pada kompleks manifestasi Jari dan Banyukuning. Sayatan dilakukan dengan satu arah terhadap sumbu X dan satu lagi terhadap sumbu Y.



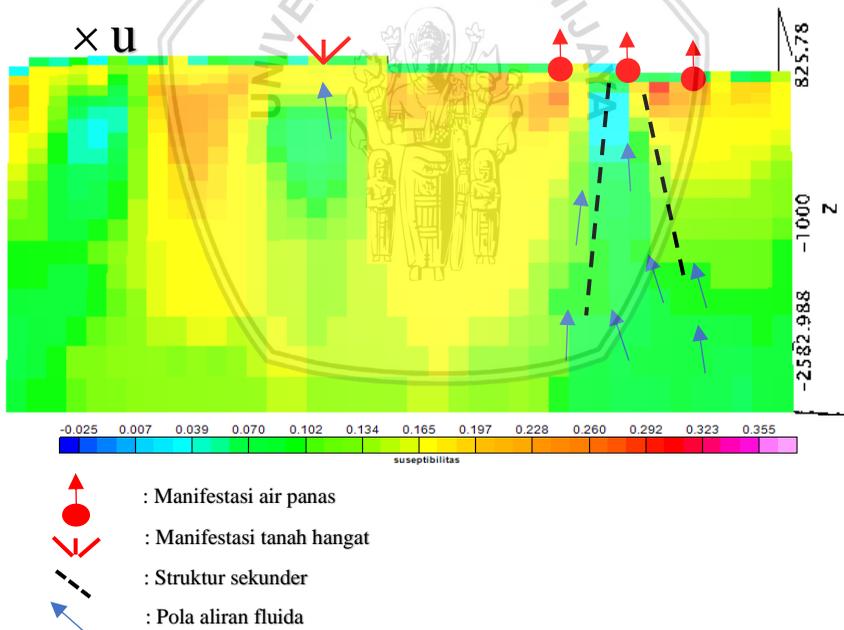
Gambar 4.5 Wilayah pemodelan anomali residual



**Gambar 4.6** Model inversi metode magnetik daerah panas bumi Gunung Pandan

#### 4.2.4.1.1 Sayatan Manifestasi Jari X-X'

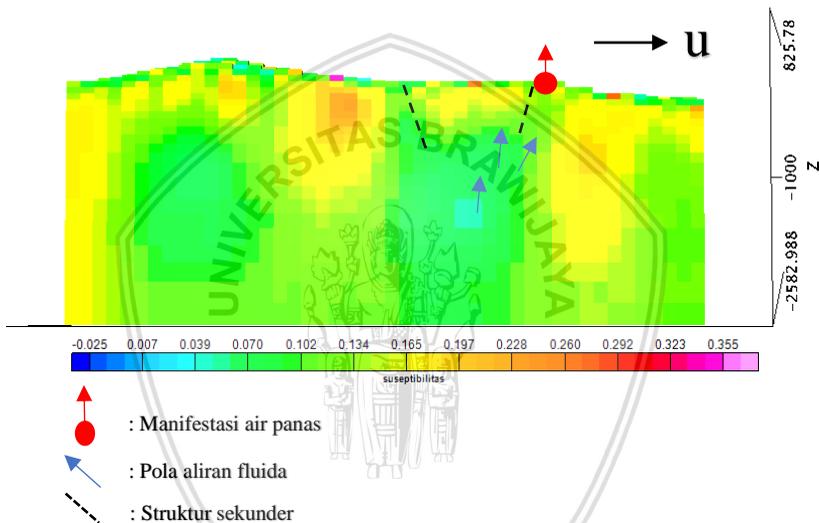
Sayatan kompleks manifestasi Jari X-X' dari kiri ke kanan berorientasi barat ke timur dan gambar sayatan ini dilihat dari arah selatan. Berdasarkan hasil pemodelan yang ditunjukkan gambar 4.7. Ada tiga kelompok batuan suseptibilitas rendah pada gambar yaitu di kanan, kiri, dan tengah. Apabila dilihat dari struktur sekunder yang ada, fluida panas mengalir dari batuan ber suseptibilitas rendah sebelah kanan karena nilai yang rendah tersebut diartikan sebagai kemenerusan reservoir ini memiliki arah kebawah yang menandakan adanya perpindahan panas dari *heat source* yang berupa fluida ke reservoir tersebut. Sedangkan suseptibilitas rendah di tengah menerobos ke permukaan dan menghasilkan manifestasi tanah panas. Jenis aliran fluida yang terjadi di kompleks manifestasi Jari merupakan aliran yang mengalir secara vertikal langsung dari reservoir atau *upflow*.



. Gambar 4.7 Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Jari xx'

#### 4.2.4.1.2 Sayatan Manifestasi Jari Y-Y'

Sayatan ini dari kiri gambar ke kanan berorientasi selatan ke utara. Gambar 4.8 memperlihatkan sayatan dari arah timur. Berdasarkan gambar terlihat manifestasi berada diantara nilai suseptibilitas 0,166 yang berwarna kuning. Hal tersebut mengindikasikan adanya struktur sekunder yang merupakan zona lemah menjadi jalan untuk fluida panas dari permukaan muncul ke permukaan.

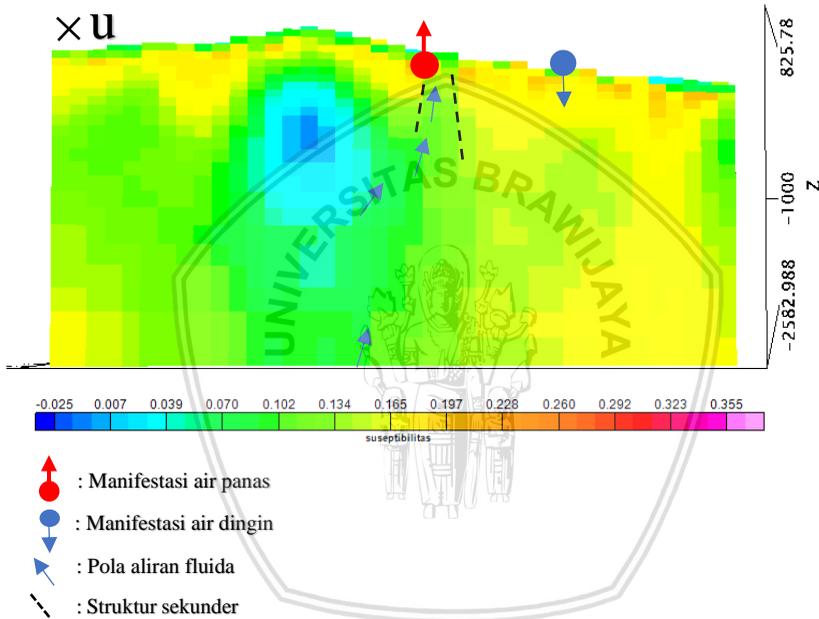


**Gambar 4.8** Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Jari yy'

Apabila dilakukan pengamatan dari arah barat seperti ini dapat dilihat titik munculnya manifestasi berada di tepi atau batasan luar dari kelompok suseptibilitas tinggi tersebut. Fluida panas mengalir dari batuan dengan nilai suseptibilitas 0,08 yang muncul ke permukaan melalui struktur sekunder atau zona lemah yang menjadi jalan fluida. Sedangkan nilai suseptibilitas rendah di selatan manifestasi tidak bisa disebut asal fluida manifestasi karena tidak adanya struktur sekunder yang mengarah ke manifestasi.

### 4.2.4.1.3 Sayatan Manifestasi Banyukuning X-X'

Sayatan pada manifestasi Banyukuning ini berarah dari barat ke timur apabila dilihat dari kiri ke kanan (ditunjukkan gambar 4.9). Mata air panas muncul berada diantara batuan dengan suseptibilitas yang bernilai 0,17. Diduga batuan suseptibilitas rendah berwarna biru muda di bawah manifestasi merupakan reservoir asal fluida manifestasi berasal karena nilai suseptibilitas rendah tersebut memiliki kemenerusan hingga kebawah.



**Gambar 4.9** Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Banyukuning xx'

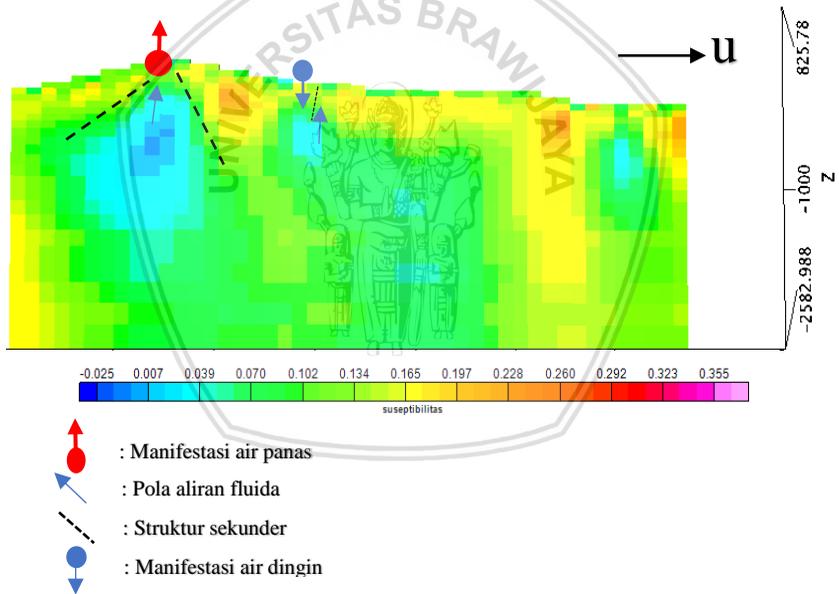
Sedangkan suseptibilitas rendah yang berada di timur mata air panas sebagai batuan *porous* yang menampung fluida yang kemudian mengalir ke permukaan hingga manifestasi mata air dingin.

Suseptibilitas rendah yang berada di timur manifestasi tidak mempunyai kemenerusan kebawah, hal tersebut mengakibatkan energi panas yang terdapat pada area tersebut tidak terlalu tinggi

suhnya dan mengakibatkan munculnya manifestasi yang berupa mata air dingin.

#### 4.2.4.1.4 Sayatan Manifestasi Banyukuning Y-Y'

Apabila dilihat dari kiri ke kanan, gambar 4.10 berarah mata angin selatan ke utara. Dari gambar dibawah diketahui bahwa manifestasi Banyukuning berada diatas sebuah suseptibilitas rendah yang bernilai -0,01 hingga 0,07. Keberadaan manifestasi ini terletak diantara nilai suseptibilitas 0,1 yang berada di utara dan selatan yang dapat di katakan bahwa fluida panas telah menerobos batuan diatasnya karena keberadaan nilai suseptibilitas 0,08 yang lebih rendah dari nilai di sekitarnya.



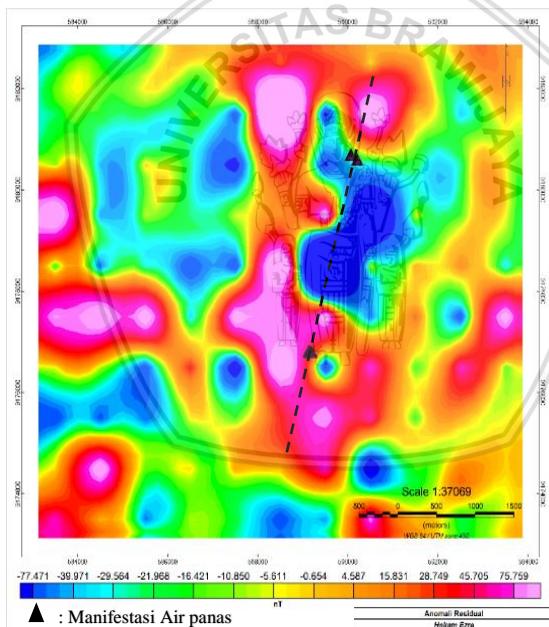
**Gambar 4.10** Sistem hidrotermal Gunung Pandan sayatan Banyukuning yy`

Dapat diduga bahwa struktur geologi dibawah manifestasi terdiri dari batuan sedimen yang heterogen yang mengartikan ada sebuah *fracture* yang menjadikan tubuh batuanya bersifat permeabel.

Air panas yang muncul pada manifestasi berasal dari nilai suseptibilitas rendah yang berada di selatan, hal ini mengindikasikan lokasi reservoir berada pada titik itu hingga kebawah. Sedangkan nilai suseptibilitas rendah yang berada di utara memiliki tubuh batuan yang lebih kecil dibandingkan yang berada di selatan yang menyebabkan munculnya manifestasi berupa mata air dingin dikarenakan energi panas yang berada dibawahnya tidak terlalu tinggi suhunya.

#### 4.2.4.2 Pemodelan *Forward*

Berdasarkan gambar 4.11 yang menunjukkan peta anomali residual magnetik, penentuan lintasan dilakukan berdasarkan titik terdapatnya manifestasi air panas seperti ditunjukkan oleh garis hitam putus-putus.

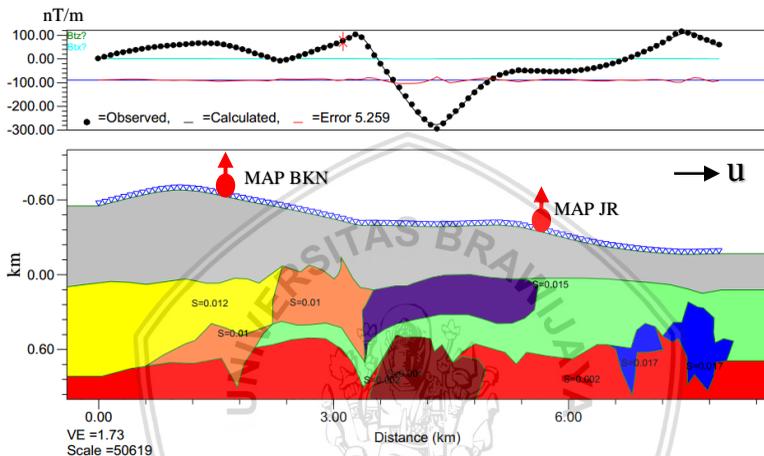


**Gambar 4.11** Lintasan pemodelan secara *forward* pada anomali residual

Hal tersebut dilakukan karena target penelitian bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan yang mendekati



reservoir panas bumi. Pemodelan secara *forward* dilakukan dengan cara membuat suatu bidang yang diduga tubuh batuan yang selanjutnya diubah parameter serta bentuknya secara *trial and error* sampai didapatkan kesesuaian antara kurva anomali akuisisi (garis putus-putus warna hitam) dengan kurva hasil pemodelan (garis hitam tegas).



**Gambar 4.12** Model *forward* pada wilayah panas bumi Gunung Pandan

Hasil pemodelan berdasarkan peta anomali residual magnetik didapatkan susunan batuan bawah permukaan seperti ditunjukkan gambar 4.12 didapatkan batuan penyusun permukaan tanah memiliki nilai suseptibilitas 0.

Apabila diurutkan dari nilai suseptibilitas terendah ke tinggi dimulai dengan batuan berwarna merah tua – merah terang – oranye – kuning – hijau pupus – ungu – biru. Anomali berupa nilai magnetik rendah terjadi karena adanya batuan bernilai suseptibilitas sangat rendah yaitu batuan berwarna merah tua yang berada diantara kedua manifestasi. Nilai suseptibilitas batuan tersebut sangat rendah dikarenakan pengaruh panas dari *heat source* yang mengakibatkan turunya nilai kemagnetan batuan.

Batuan berwarna merah terang memiliki nilai suseptibilitas yang tidak jauh beda dengan yang berwarna merah tua yaitu 0,002.

Hal tersebut menandakan bahwa memang ada aktifitas *thermal* dibawah permukaan sepanjang garis pemodelan, tetapi arah panas cenderung mengarah ke batuan yang berwarna merah tua. Kemungkinan batuan ini merupakan batuan yang terdapat struktur sekunder di tubuh batuan dan bersifat *permeable* sehingga dapat meloloskan fluida untuk selanjutnya menuju permukaan, lalu mengalir keatas menerobos diantara batuan berwarna hijau pupus dan ungu untuk selanjutnya muncul sebagai manifestasi air panas di Desa Jari.

Selanjutnya batuan berwarna oranye yang nilai suseptibilitasnya 0,01 terdapat struktur sekunder pada tubuh batuan. Adanya struktur tersebut yang menjadi jalan fluida panas untuk mencari jalan menuju permukaan di Desa Banyukuning.

Untuk batuan yang berwarna ungu yang memiliki nilai suseptibilitas 0,015 diduga batuan sedimen yang memiliki sifat *impermeable* atau tidak dapat meloloskan fluida. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya manifestasi berupa fluida cair atau gas yang terdapat diatas tubuh batuan ini. Manifestasi Jari yang letaknya terdekat posisinya tidak tepat diatas batuan ini melainkan berada diatas antara batuan warna ungu dengan hijau pupus yang kemungkinan terdapat sebuah struktur sekunder.

#### 4.2.5 Pemetaan Lokasi Reservoir

Untuk penentuan lokasi reservoir dapat ditentukan dengan memanfaatkan adanya nilai suseptibilitas rendah yang muncul pada hasil proses inversi dan kemuculan manifestasi panas bumi. Nilai suseptibilitas yang diambil yaitu -0,01 sampai 0,07. Keberadaan manifestasi menunjukan adanya aktifitas panas bumi dibawahnya dan menunjukan lokasi reservoir yang merupakan asal dari air panas yang muncul dipermukaan.

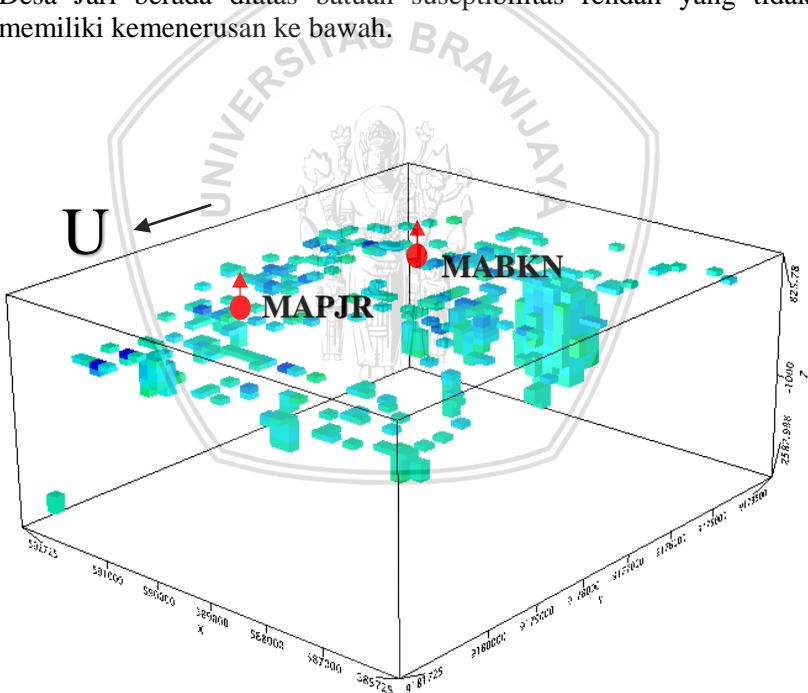
Gambar 4.13; 4.14; dan 4.15 menunjukan hasil inversi dari berbagai sudut pandang yaitu tampak dari utara, timur, dan bawah. Hal tersebut dilakukan untuk mempermudah pengamatan dari anomali rendah yang terdapat pada masing-masing manifestasi.

Dalam penelitian ini terdapat dua kelompok mata air panas yaitu Jari (MAPJR) dan Banyukuning (MAPBKN) yang jarak satu dengan yang lain kurang lebih 3 km. Kelompok mata air panas Jari

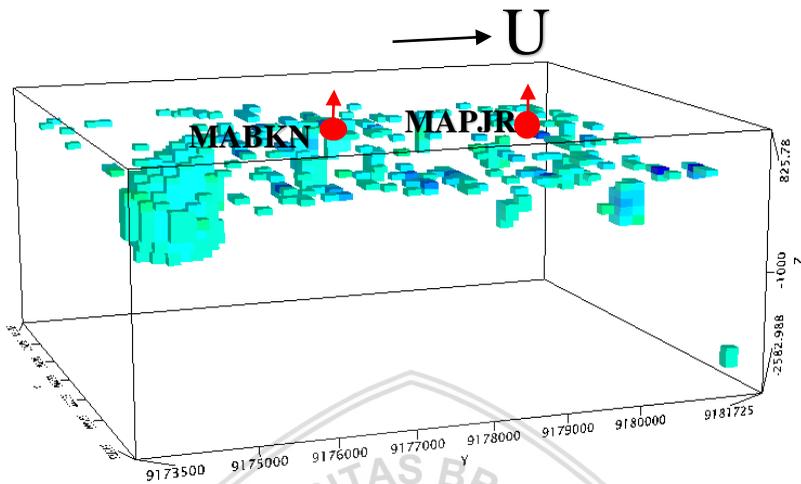
memiliki suhu air yang lebih tinggi dibandingkan kelompok Banyukuning dengan nilai suhu rata-rata 39 °C dan pada kelompok mata air panas Banyukuning 35 °C.

Mata air panas Jari yang muncul di sebelah utara kompleks Banyukuning memiliki bidang nilai suseptibilitas tersendiri seperti ditunjukkan oleh gambar 4.14. Hal tersebut menunjukkan adanya perbedaan asal air panas pada tiap manifestasi air panas yang muncul. Dibawah mata air panas Banyukuning terdapat nilai batuan dengan suseptibilitas rendah yang dapat diduga sebagai asal air panas yang berada di sebelah barat. Namun kelompok reservoir dibawah Desa Banyukuning memiliki ukuran yang lebih besar dan nilai suseptibilitas lebih rendah daripada manifestasi Jari.

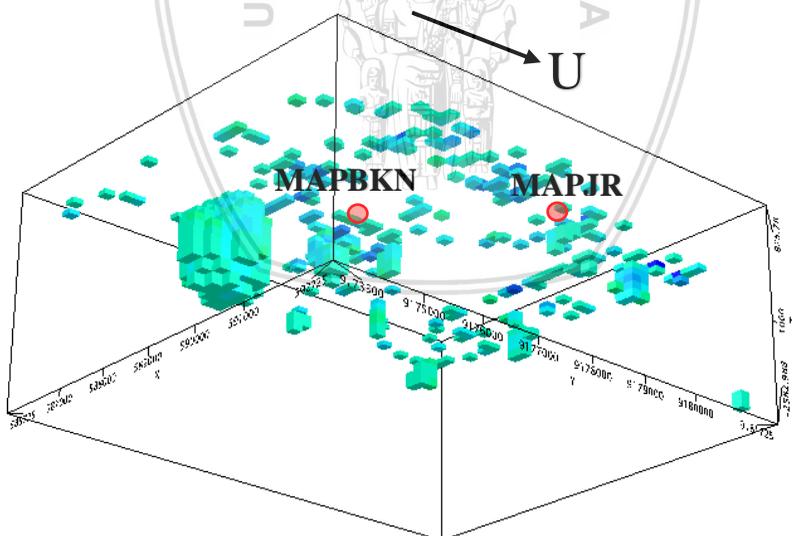
Dari gambar 4.15 terlihat bahwa kemunculan manifestasi di Desa Jari berada diatas batuan suseptibilitas rendah yang tidak memiliki kemenerusan ke bawah.



**Gambar 4.13** Tampak utara model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,035 sampai 0,117.



**Gambar 4.14** Tampak timur model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,035 sampai 0,117.

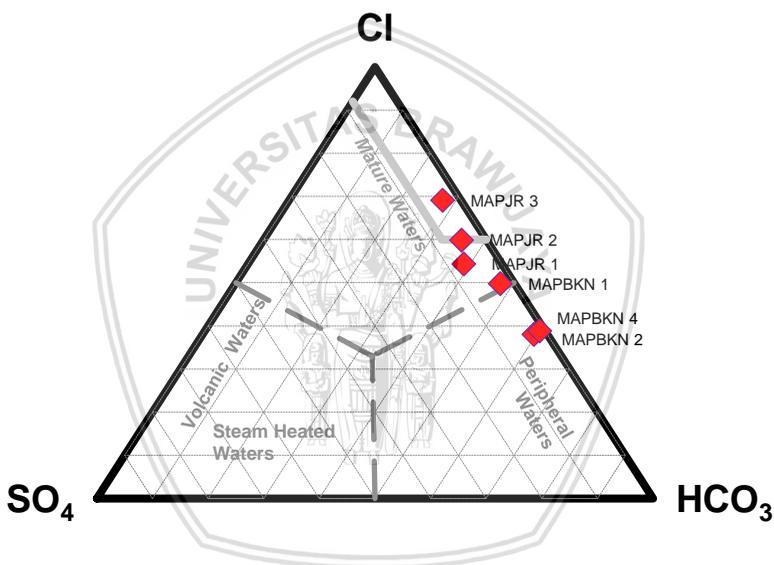


**Gambar 4.15** Tampak bawah model inversi pada rentang nilai suseptibilitas -0,035 sampai 0,117.

### 4.3 Analisa Metode Geokimia

Untuk mendapatkan data geokimia panas bumi Gunung Pandan dilakukan kegiatan pengamatan dan pengukuran sifat fisik dan kimia manifestasi panas bumi berupa pengambilan sampel air. Sampel dari lapangan selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk di analisa guna mengetahui kandungan unsur kimianya. Selanjutnya dari data-data lapangan, hasil analisa laboratorium, dan data sekunder digunakan untuk proses interpretasi daerah prospek panas bumi.

#### 4.3.1 Analisa Tipe Air



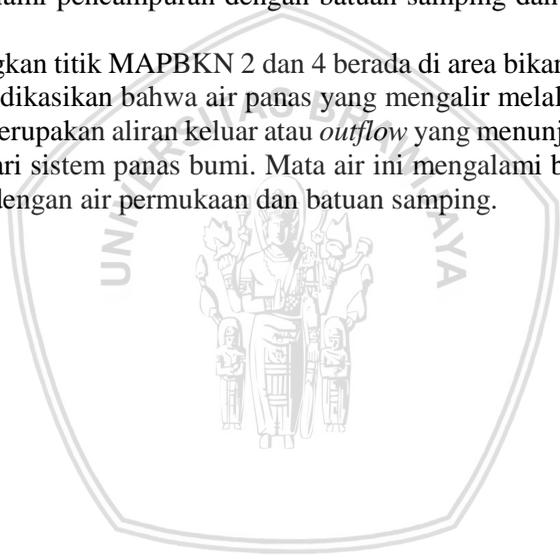
**Gambar 4.16** Diagram Trilinear Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> wilayah panas bumi Gunung Pandan

Fluida pada manifestasi dapat dijadikan indikasi untuk mengetahui ada tidaknya potensi panas bumi dengan menggunakan analisa geokimia. Salah satu kegunaan analisa geokimia yaitu untuk mengetahui asal fluida dari bawah permukaan dengan menggunakan diagram segitiga seperti pada gambar 4.16. Sebelum dilakukan analisa, dilakukan dahulu sampling fluida manifestasi untuk diketahui

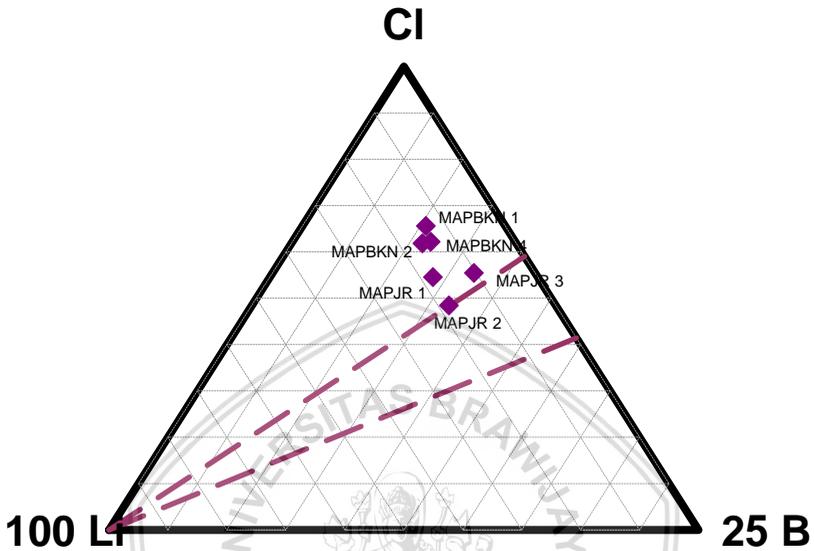
komposisi unsur kimianya dan isotop air. Proses selanjutnya dilakukan plot data hasil laboratorium tersebut pada diagram segitiga Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>.

Berdasarkan gambar 4.16 diketahui semua MAPJR 1, 2, 3, dan MAPBKN 1 berada di area *mature water* atau air matang yang mengindikasikan mata air di empat titik tersebut valid untuk dilakukan pengamatan geokimia lanjut. Hal tersebut mengindikasikan kandungan klorida lebih dominan dibandingkan sulfat dan bikarbonat sehingga layak digunakan dalam penentuan temperatur reservoir panas bumi. Kandungan klorida tinggi juga menandakan bahwa fluida mata air panas berasal langsung dari Reservoir tanpa banyak mengalami pencampuran dengan batuan samping dan fluida lain.

Sedangkan titik MAPBKN 2 dan 4 berada di area bikarbonat. Hal ini mengindikasikan bahwa air panas yang mengalir melalui dua titik tersebut merupakan aliran keluar atau *outflow* yang menunjukkan batas terluar dari sistem panas bumi. Mata air ini mengalami banyak pencampuran dengan air permukaan dan batuan samping.



### 4.3.2 Asal Air Panas

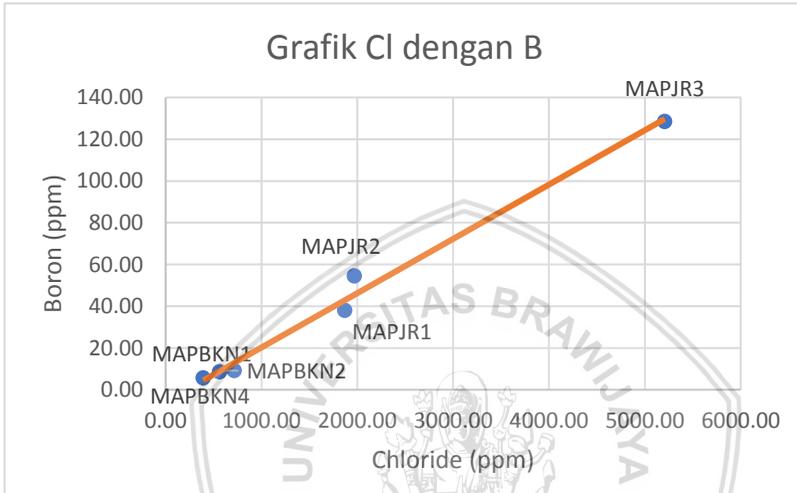


**Gambar 4.17** Diagram Trilinear CI-Li-B wilayah panas bumi Gunung Pandan

Ploting pada diagram CI-Li-B dilakukan untuk mengetahui asal batuan reservoir dan mengetahui keberadaan interaksi fluida panas dengan batuan. Unsur Klorida, Litium, dan Boron merupakan unsur-unsur konservatif yang berarti apabila unsur tersebut telah terbentuk maka unsur tersebut tidak akan mengalami banyak perubahan dalam suatu pergerakan fluida panas bumi dari reservoir asal air tersebut.

Berdasarkan diagram pada gambar 4.17 persebaran mata air panas berada cenderung menuju arah CI. Hal tersebut mungkin terjadi karena homogenitas komposisi batuan reservoir asal air panas. Klorida dan Boron termasuk ke dalam unsur terlarut yang melimpah pada fase cair daripada di fase padat (mineral). Pada saat berada dalam larutan kedua unsur ini tidak mudah untuk bereaksi. Unsur ini bersifat konservatif, yang bertahan pada fase cair

(Simmons, 1995). Untuk mengetahui kesamaan asal air panas manifestasi digunakan rasio Cl/B dan Cl-B-Li seperti pada gambar 4.18. Konsentrasi boron yang sangat tinggi (800-1000 mg/kg) dapat ditemukan pada fluida yang berasosiasi dengan batuan sedimen kaya organik (Nicholson, 1993).



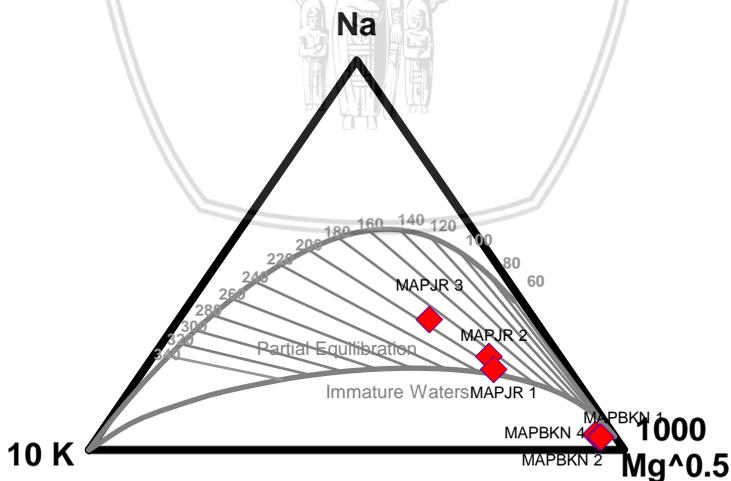
**Gambar 4.18** Ploting rasio Cl/B menunjukkan air manifestasi berasal dari reservoir yang sama

Berdasarkan data manifestasi kompleks Jari dan Banyukuning yang ditampilkan gambar 4.18 dapat dikatakan bahwa seluruh air manifestasi memiliki kesamaan asal fluida. Keceragaman rasio Li/Cl menunjukkan bahwa air panas sangat sedikit mengalami interaksi secara kimiawi dengan batuan sekitar. Pada kompleks Banyukuning, kandungan Boron pada air panasnya rendah dan dapat dikatakan batuan yang lebih berpengaruh ialah batuan beku, bukan batuan sedimen yang dapat meningkatkan kandungan B dalam air panas. Sedangkan berdasar plot diagram pada gambar dibawah diketahui semua manifestasi berada pada zona Absorption of Low B/Cl steam.

### 4.3.3 Nilai Temperatur Reservoir dan Kesetimbangan Fluida

Metode geotermometer Na-K-Mg sangat ideal untuk mengevaluasi kondisi reservoir maupun kondisi dekat permukaan (Lawless, 1996). Geotermometer ini terdiri dari dua jenis geotermometer, yaitu Na-K yang merepresentasikan proses kesetimbangan reaksi di dalam reservoir yang lambat dan K-Mg untuk proses kesetimbangan reaksi yang cepat pada daerah yang mendekati permukaan. Pada gambar 4.19 semua titik MAPBKN berada pada daerah *immature water* yang sesuai dengan diagram Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> dimana kompek MAPBKN termasuk dalam daerah bikarbonat atau fluida yang telah banyak mengalami pencampuran dengan fluida lain khususnya air permukaan, sehingga data geokimia pada mata air tersebut tidak dapat digunakan untuk menentukan temperatur reservoir.

Sedangkan semua titik MAPJR berada pada wilayah fluida yang mengalami kesetimbangan sebagian (*partial equilibration*), dimana titik yang berada pada wilayah tersebut dapat digunakan untuk menentukan temperatur reservoir. Menurut plot diagram geotermometer Na-K-Mg didapatkan nilai temperatur reservoir berkisar antara 190-210 °C.



**Gambar 4.19** Diagram Trilinear Na-K-Ca wilayah panas bumi Gunung Pandan

#### 4.3.4 Analisa Geotermometer

Untuk memperkirakan temperatur reservoir panas bumi Gunung Pandan dilakukan perhitungan menggunakan metode geotermometer dengan menggunakan kandungan unsur  $\text{SiO}_2$ , Na, K, dan Ca dengan asumsi bahwa fluida reservoir berada di dalam kesetimbangan dengan unsur-unsur tersebut, karena menurut (Truesdell, 1975) dan (White, 1970) komposisi kimia air hangat dapat mencirikan temperatur di bawah permukaan. Geotermometer digunakan untuk mengetahui temperatur reservoir panas bumi di bawah permukaan.

Geotermometer yang digunakan adalah geotermometer Silika, yaitu kuarsa konduktif yang memperhitungkan tidak ada uap yang hilang (No Steam Loss) dan kuarsa konduktif yang memperhitungkan kondisi maksimum uap yang hilang (Max Steam Loss). Selanjutnya digunakan juga geotermometer Na-K yang diberikan oleh Fournier (1979) atau Na-K-Ca (Giggenbach, 1989).

**Tabel 4.1** Temperatur reservoir hasil perhitungan Geotermometer air

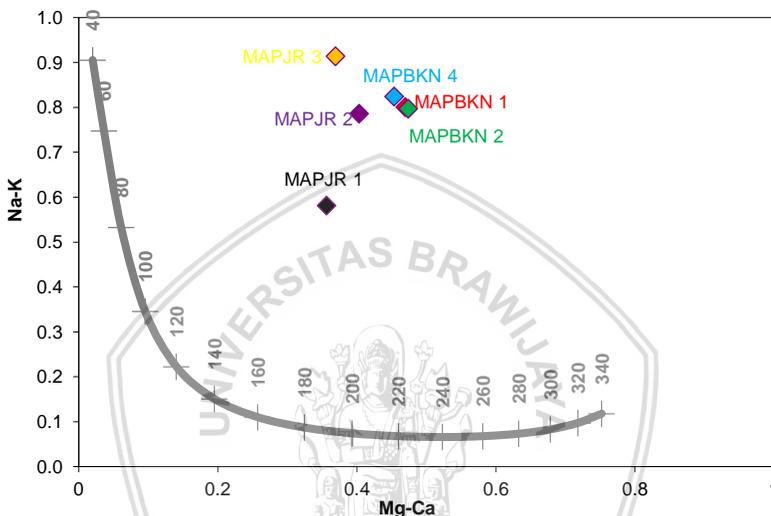
No	Geotermometer	MAPJR 1	MAPJR 2	MAPJR 3	MAPBKN 1	MAPBKN 2	MAPBKN 4
1	T $\text{SiO}_2$ max, steam loss/fournier, 1977	140	147	157	162	159	157
2	T $\text{SiO}_2$ no, steam loss/fournier, 1977	146	154	167	172	169	167
3	T Kalsedon/Fournier, 1977	121	129	143	150	146	143
4	T Na/K/Truesdell, 1976	132	149	136	175	177	168
5	T Na/K/Fournier, 1979	171	186	175	207	208	202
6	T NaK/Giggenbach, 1963	189	203	193	223	224	218

Perhitungan yang dilakukan pada semua mata air Banyukuning tidak dapat digunakan untuk acuan penentuan suhu reservoir, karena air panas yang keluar merupakan air yang tidak matang (*immature water*).

Berdasarkan tabel 4.1 temperatur reservoir panas bumi bernilai sekitar 189 – 193 °C. Temperatur tersebut berdasarkan hasil perhitungan dari geotermometer Na-K (Giggenbach, 1989). Nilai pada geotermometer Na-K digunakan sebagai acuan karena untuk

pembandingan dengan perhitungan suhu reservoir dengan diagram trilinear Na-K-Mg.

### 4.3.5 Nilai Temperatur Reservoir Berdasarkan *Crossplot* Na/K dengan Mg/Ca



**Gambar 4.20** Crossplot Na-K/Mg-Ca untuk menentukan temperatur reservoir

*Cross plot* Na/K dengan Mg-Ca merupakan *geoindikator* untuk mengetahui temperatur reservoir yang diakibatkan adanya keseimbangan Mg-Ca. Dari grafik diatas dapat diketahui temperatur reservoir berdasarkan MAPJR 1, 2, dan 3 berturut-turut yaitu 195, 190, dan 205 °C. Sedangkan semua titik MAPBKN merupakan kelompok *immature water* atau air yang tidak matang sehingga tidak dapat digunakan menentukan nilai temperatur.

### 4.3.6 Pembahasan Analisa Geokimia

Berdasarkan analisa geokimia dari mata air panas di Desa Jari dan Banyukuning dapat diinterpretasikan sebagai berikut :

1. Air panas pada mata air Jari merupakan air Klorida dan pada mata air Banyukuning merupakan *meteoric water*

2. Air panas yang muncul di Desa Jari menunjukkan pemunculan aliran secara langsung (*upflow*), sedangkan pada Desa Banyukuning merupakan pemunculan aliran air secara lateral (*outflow*).
3. Mata air Banyukuning merupakan batas terluar dari sistem panas bumi Gunung Pandan.

Berdasarkan dari pola aliran fluida bawah permukaan dapat diinterpretasikan bahwa daerah pemunculan air panas di suplai oleh reservoir yang berada di barat dan utara daerah penelitian. Mata air Banyukuning berasal dari reservoir di barat daerah survei yang berada dibawah puncak Gunung Pandan, sedangkan mata air panas Jari berasal dari sistem yang terpisah dengan reservoir yang menyuplai mata air Banyukuning yang berada di utara daerah survei.

Analisa geotermometer Na/K menghasilkan nilai temperatur resevoir bernilai 189-193 °C. Untuk analisa dengan diagram NaKMg menghasilkan nilai temperatur reservoir 190-210 °C. Sedangkan berdasarkan *Crossplot* Na-K/Mg-Ca menghasilkan nilai temperatur 190-205 °C. Menurut Hochstein (1990) untuk persebaran nilai temperatur reservoir 125-225 °C dikategorikan pada sistem entalpi sedang. Sehingga sistem panas bumi di daerah Gunung Pandan dapat di klasifikasikan ke dalam sistem panas bumi entalpi sedang (125–225 °C).

**Tabel 4.2** Klasifikasi Sistem Panas bumi

Sistem Panas bumi	Muffer & Cataldi (1978)	Benderiter & Cormy (1990)	Haenal, et al (1988)	Hochstein (1990)
<b>Entalpi Rendah</b>	<90 °C	<100 °C	<150 °C	<125 °C
<b>Entalpi Sedang</b>	90-150 °C	100-200 °C	-	125-225 °C
<b>Entalpi Tinggi</b>	>150 °C	>200 °C	>150 °C	>225 °C

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Struktur bawah permukaan yang teridentifikasi berdasarkan pemodelan secara *forward modelling* menunjukkan bahwa batuan yang ada disepanjang garis pemodelan yang berada diantara dua manifestasi mayoritas merupakan batuan sedimen dimana terdapat beberapa struktur geologi berupa sesar/patahan yang menjadi jalan fluida panas yang berasal dari batuan reservoir untuk mencapai permukaan.
2. Berdasarkan pemodelan secara tiga dimensi menggunakan *Voxi Oasis Montaj 8.3* dapat diketahui bahwa masing-masing manifestasi yaitu yang berada di Desa Jari dan Banyukuning memiliki reservoir yang berbeda. Manifestasi Jari mempunyai reservoir yang mempunyai kemenerusan ke arah timur laut sedangkan manifestasi Banyukuning disuplai oleh reservoir yang berada di arah barat wilayah penelitian. Kedua reservoir menyuplai kedua manifestasi tersebut tidak memiliki hubungan apabila dilihat berdasar nilai anomali magnetik.
3. Manifestasi pada Desa Jari merupakan aliran secara langsung (*upflow*) karena senyawa kimia yang dominan pada air nya adalah klorid, sedangkan pada manifestasi Banyukuning merupakan pemunculan air panas secara *outflow* atau aliran lateral yang dibuktikan dengan air yang mengandung bikarbonat yang lebih tinggi dibandingkan kandungan klorida dan sulfat.
4. Reservoir pada wilayah Gunung Pandan memiliki temperatur yang masuk kedalam klasifikasi temperatur panas bumi entalpi sedang yaitu 125-225°C berdasarkan perhitungan dengan geotermometer Na/K, analisa *weir box*, dan *crossplot* Na-K/Mg-Ca.

## 5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, disarankan untuk melakukan survei geologi untuk mendapatkan data pemboran atau *coring* untuk mempertajam hasil kajian berdasarkan pemodelan data magnetik dan geokimia yang telah dilakukan dan melakukan perhitungan besar potensi panas bumi menggunakan metode volumetrik.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Aribowo, Yoga, dan Heri Nurohman. 2012. Studi Geokimia Air Panas Area Prospek Pans bumi Gunung Kendalisodo Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Teknik*. 33 (1) : 32-36
- Arnorsson, S, D'Amore F, dan Gerardo J. 2000. Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use. International Atomic Energy Agency. Vienna. P. 351
- Bemmelen, Van, R.W. 1949. The Geology of Indonesia. Martinus Nyhoff, The Haque, Nederland.
- Blakely, and Richard.J. 1996. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press. Cambridge.
- Breiner, S. 1973. Applications Manual for Portable Magnetometers. Geometric, Sunnyvale, California.
- Dickson, Mary H, dan Mario Fanelli. 2004. Geothermal Energy. Instuto di Geoscienze e Georisorse. Italy.
- Ellis, A.J. dan Mahon, W.A.J., 1977, Chemistry and geothermal systems. Academic Press, New York.
- Fournier, R.O. 1979b. A Revised Equation for The Na/K Geothermometer. *Geotherm. Res. Counc. Trans.* 5,1-16.
- Telford, M.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 1990. Applied Gephysics, second edition. USA: Cambridge University Press
- Giggenbach, WF., and Goguel. 1989. Methods For the Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Samples. Petone New Zealand.

Henley, R.W and Ellis, A.J. 1983. Geothermal System, Ancient and Modern. Earth Science Reviews.

Karingithi, C.W. 2009. Chemical Geotermometers for Geothermal Exploration. ShortCourse IV on Exploration for Geothermal Resources in United Nations University. Lake Vaivasha.

Lesmana, O.I. 2007. Pendugaan Struktur 3D Waduk Energi Vulkanik-Geothermal Kompleks Arjuno-Welirang Berdasarkan Anomali Magnetik Pseudogravitasi. Skripsi. Jurusan Fisika. Universitas Brawijaya. Malang.

Lillie, Robert J. 1999. Whole Earth Geophysics: an introductory textbook for geologists and geophysicists. New Jersey: Prentice-Hall.

Marks, P. 1957. Stratigraphic Lexicon of Indonesia: Pus. Jaw, Geol, Publ. Keilmuan, No 31A, Seri Geologi.

Nicholson, K. 1993. Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany.

Pri Utami. 1998. Hydrothermal Alteration Study of The Kamojang Geothermal Field, West Java. Tesis, University of Auckland, New Zeland.

Pringgoprawiro, H. & Sukido, 1992, Geologi Lembar Bojonegoro, Jawa, Skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 23 h.

Saptadji, N.M.1997. Teknik Panas Bumi. Bandung. Departemen Teknik Perminyakan Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Mineral. ITB

Satiawan, S. 2009. Aplikasi Kontinuasi Keatas dan Filter Panjang Gelombang Untuk Memisahkan Anomali Regional dan Residual Pada Data Geomagnetik. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Geofisika. Institut Teknologi Bandung.

Simmons, S.F. 1998. Geochemistry Lecture Notes. Geothermal Institute. University of Auckland.

Sleep, N.H and Fujita, K. 1997. Principles of Geophysics. Printed and bound by Hamilton Printing Co, USA.

Small Geothermal Resources. UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources. Rome, Italy.

Sumintadireja, 2005. Vulkanologi dan Geothermal. Institut Teknologi Bandung Press. Bandung

Sukhyar, R. Dkk. 2014. Potensi dan Pengembangan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia. Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung.

Truesdell, A.H. 1975. Geochemical Techniques in Exploration. Proc. 2nd UN Symp. Development and Use of Geothermal Resources 1, 53-86.

Telford, et al. 1991. Applied Gephysics, secondedition. USA: Cambridge University Press

Wahyudi dkk. 2004. Analisis Data Magnetik untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Air Panas di Lereng Utara Gunung Api Ungaran. Yogyakarta. PIT HAGI ke 29.

Wirasantosa, S. 1984. Teknik Pengukuran dalam Metoda Geomagnet. Institut Teknologi Bandung Press. Bandung.

White, D.E. 1970. Geochemistry Applied to the Discovery, evaluation, and Exploitation of Geothermal Energy Resource, in Proceedings United Nation Syrnop. On the Development and Utilization of Geothermal Energy, Pisa, 1970, v. 1, part 2 Geothermics, Spec. Issue 2.



## LAMPIRAN

### Lampiran 1 : Data geokimia manifestasi

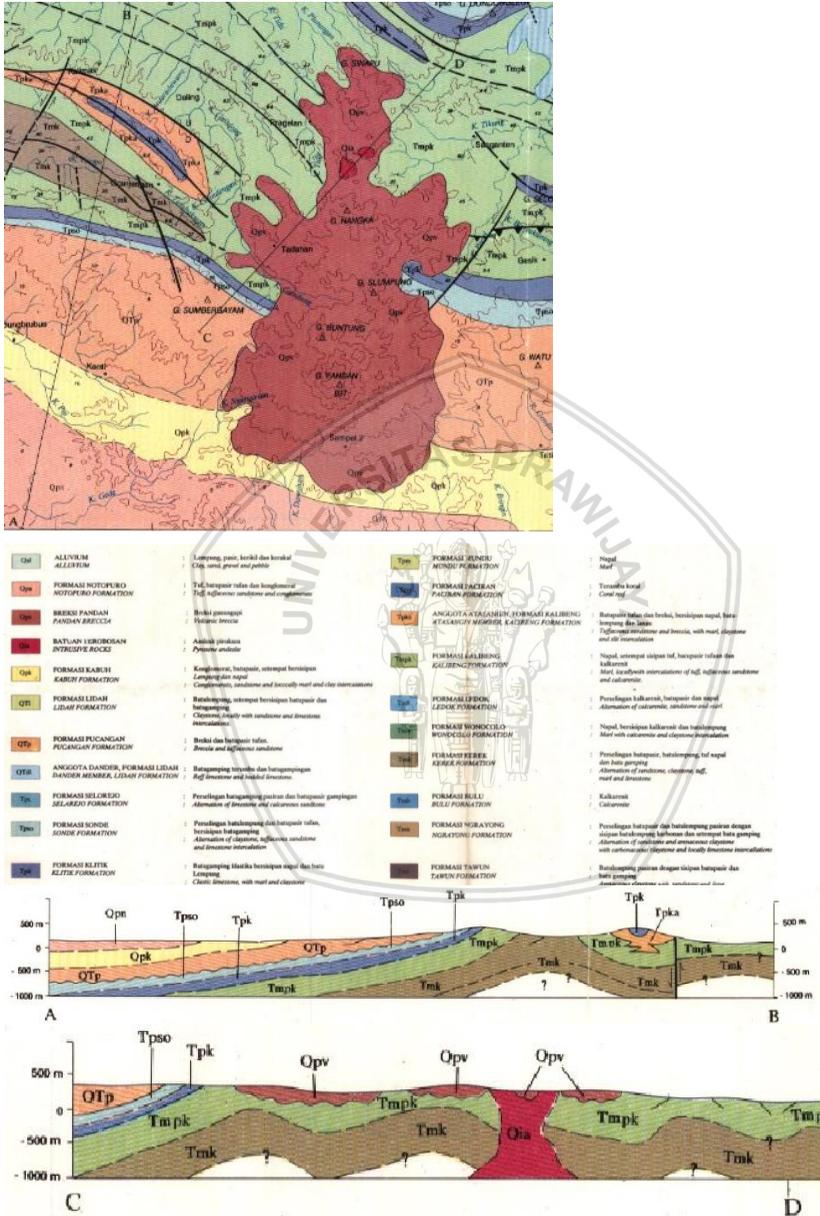
**Tabel L 1.1 Kandungan kimia manifestasi wilayah Gunung Pandan**

Sample Label	Temp C	pH	Li	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>	B	Cl	F	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>
MAPJR 1	40	7,1	6,09	1697	94	142,3	19,73	117	38	1871	1	237	1334
MAPJR 2	35,4	7,39	7,36	1598	108	69,1	25,41	134	55	1971	1	148	1172
MAPJR 3	43,1	7,57	9,77	4215	247	32,9	34,78	163	129	5208	0	249	2077
MAPBKN 1	35,5	6,02	1,47	372	33	196,5	78,90	177	9	717	0	37	685
MAPBKN 2	36,7	7,07	1,3	324	29	212,7	83,43	170	9	564	1	36	882
MAPBKN 4	33,1	6,88	1,01	254	21	115,6	54,22	163	6	393	1	10	609

**Tabel L 1.2 Koordinat Manifestasi**

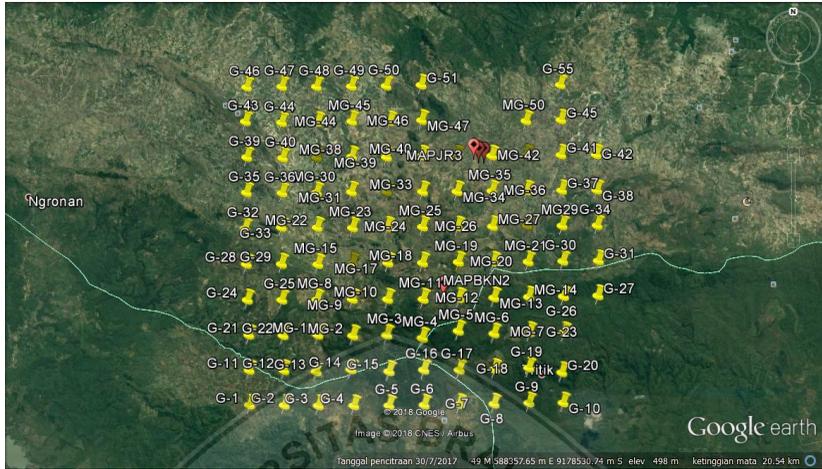
Sample Label	UTM east	UTM north
MAPJR 1	590.358	9.180.555
MAPJR 2	590.207	9.180.564
MAPJR 3	590.064	9.180.662
MAPBKN 1	589.135	9.176.787
MAPBKN 2	589.144	9.176.778
MAPBKN 4	589.189	9.176.769

# Lampiran 2 : Peta Geologi Bojonegoro (Pringgoprawiro, 1992)



Gambar L 2 Peta geologi lembar Bojonegoro

### Lampiran 3 : Desain survei metode magnetik



**Gambar L 3 Desain survei metode magnetik wilayah Gunung Pandan**

Luas area survei 10 x 9 km dan jarak antar titik kurang lebih 1 km.

## Lampiran 4 : Nilai suseptibilitas batuan oleh (Telford, 1990)

**Tabel L 4 Suseptibilitas batuan menurut Telford**

Batuan/Mineral	Suseptibilitas ( $\times 10^3$ emu)	
	Interval	Rata-rata
<b>Batuan sedimen</b>		
Dolomit	0-0.9	0,1
Batu kapur	0-3	0,3
Batu pasir	0-20	0,4
Lempung	0,01-15	0,6
Rata-rata sedimen	0-18	0,9
<b>Batuan Metamorf</b>		
Amfibolit		0,7
Sekis	0,3-3	1,4
Philit		1,5
Gneiss	0,1-25	
Kuarsit		4
Serpentinit	3-17	
Slate	0-35	6
Rata-rata metamorf	0-70	4,2
<b>Batuan beku</b>		
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
Basalt	0,2-175	70

Lanjutan tabel L 4 Suseptibilitas batuan menurut Telford

Batuan/Mineral	Suseptibilitas ( $\times 10^3$ emu)	
	Interval	Rata-rata
Diorit	0,6-120	85
Piroxenit		125
Peridotit	90-200	150
Andesit		160
Rata-rata beku biasa	0-80	8
<b>Mineral</b>		
Grafit		0,1
Quartz		-0,01
Garam batu		-0,01
Anidrite, batu kapur		-0,01
Kalsit	-0,001 – (-0,01)	
Batubara		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
Arsenopyrit		3
Hematit	0,5-35	6,5
Chromit	3-110	7
Franklinit		430
Pirrotit	1-6000	1500
Ilmenit	300-3500	1800
Magnetit	1200-19200	6000

## Lampiran 5 : Data hasil akuisisi

**Tabel L 5 Data hasil akuisisi (Tanggal 24 – 29 September 2012)**

Koordinat		Elevasi	Pembacaan	delta H
x	y			
583502,12	9173507,97	240,81	45433,9	397,8
584499,9	9173500,84	245,09	45299,2	254,4
585491,22	9173504,93	340,6	45119,4	77,1
586501,81	9173502,6	381,14	45160,1	121,7
587502,49	9173499,25	421,73	45136	99,7
588501,23	9173501,46	424,21	45018	28,7
589498,07	9173500,65	394,77	45102	108,6
590492,08	9173494,45	313,38	45294,7	353,9
591496,8	9173508,16	233,16	45149	177,5
592479,78	9173490,64	187,28	45083	103,5
583507,88	9174496,28	276,66	45259,1	235,1
584507,25	9174489,16	298,81	45505,8	483,8
585440,78	9174462,23	363,18	45165	154,3
586441,26	9174540,29	505,31	45186	145,1
587517,74	9174487,87	539,55	45166	181,6
588495,42	9174536,1	639,95	45179,5	239,5
589500,68	9174497,15	468,81	45379,3	379,3
590499,08	9174488	413,88	44972	-47,7
591490,58	9174505,06	329,49	450237	120,9
592453,46	9174346,12	185,12	45132,8	195,1
583517,57	9175498,33	322,68	45059,3	55,4
584510,89	9175488,49	393,78	45093,6	72,5
592509,77	9175484,32	282,39	45200	186

**Lanjutan tabel L 5 Data hasil akuisisi (Tanggal 24 – 29 September 2012)**

Koordinat		Elevasi	Pembacaan	Delta H
X	Y			
586499,38	9182496,77	206,09	45106	152,5
587495,02	9182498,38	205,29	45260,5	289,6
588497,84	9182503,62	262,41	45362	385,3
9182496,9	589500,8	192,35	45341,3	364,8
9182511,27	590490,05	179,56	45233,4	258
9182500,99	591483,11	182,4	45185,2	217,6
592496,85	9182500,96	143,43	45125,3	149,9
585508,61	9175504,53	466,15	45067,6	46,1
586513,79	9175495,97	596,52	45175,4	156,4
587466,71	9175510,24	617,35	45165	172,2
588458,75	9175442,98	848,38	45262,9	371,3
589477,54	9175598,28	560,88	45532,5	518,1
590495,2	9175496,43	428,21	45365,4	358,4
591514,37	9175508,65	317,75	45176,5	157,2
585493,82	9176494,98	505,75	45102,5	82,5
586501,58	9176502,12	520,28	45242,4	264,9
587500,95	9176501,61	630,89	45042,3	25,9
588495,75	9176491,97	586,17	45644,5	626,8
589505,07	9176495,09	524,27	45177,4	161,5
590505,55	9176497,69	406,17	45374	358
591499,65	9176504,26	344,48	45170,1	154,1
585525,16	9177476,94	447,55	45487,8	507,8
586498,64	9177493,4	419,21	45163	147,4
587510,62	9177502,96	459,85	45483,8	489,5

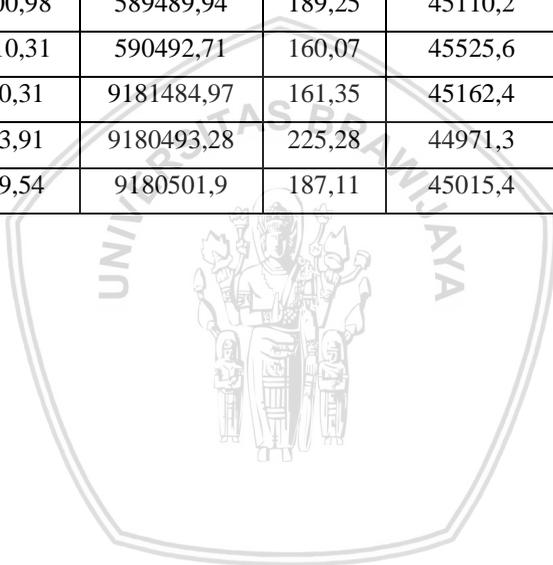
**Lanjutan tabel L 5 Data hasil akuisisi (Tanggal 24 – 29 September 2012)**

Koordinat		Elevasi	Pembacaan	Delta H
X	Y			
58905,54	9177504,89	394,6	45311,1	344,1
590502,08	9177493,81	400,48	45000,5	-3,1
591500,44	9177490,73	305,15	45152,9	142,6
585498,29	9178510,17	310,66	45107,4	127,1
586509,01	9178491,6	391,21	44970	-14,4
587503,46	9178499,93	407,67	45049,6	60,9
588489,95	9177496	497,06	45489,9	490,7
588499,77	9178499,39	492,14	45554,8	549,2
589498,37	9178488,72	402,21	44092,3	-922,9
590495,07	9178495,16	294,96	44887,8	-124,3
591494,58	9178508,94	236,31	45034	29,1
592490,92	9178498,57	248,48	45127,2	120,7
585480,88	9179496,89	252,21	45063,2	91,7
586484,97	9179502,87	307,15	45057,5	43,4
587493,48	9179495,83	395,4	45114,4	107,9
588509,88	9179484,95	450,09	45160,9	195,7
589486,87	9179479,31	490,2	45176,2	205,6
590488,47	9179493,36	285,89	44452	-482,1
591499,87	9179494,42	203,34	44968,7	-45,3
585487,39	9180493,38	207,95	45053	83,4
586501,72	9180494,86	334,73	45045,2	32,2
587488,32	9180479,88	266,83	44906,1	-57,1
588498,3	9180496,12	294,5	45350,5	348,5
589497,63	9180493,19	236,2	44958,2	-9,8



**Lanjutan tabel L 5 Data hasil akuisisi (Tanggal 24 – 29 September 2012)**

Koordinat		Elevasi	Pembacaan	Delta H
X	Y			
585525,39	9181491,68	219,63	45019,4	52,2
586504,87	9181501,55	260,18	45084,3	82,3
587592,4	9181490,1	217,18	45074,8	107,5
588501,9	9181503,17	281,94	46014,4	1037,1
9181500,98	589489,94	189,25	45110,2	134,4
9181510,31	590492,71	160,07	45525,6	544,9
591500,31	9181484,97	161,35	45162,4	167,2
590503,91	9180493,28	225,28	44971,3	-3,9
591499,54	9180501,9	187,11	45015,4	6,1



**Lampiran 6 : Suseptibilitas Batuan menurut Clark dan Emerson (1991) dan Hunt et al. (1995)**

**Tabel L 6 Suseptibilitas batuan (Hunt et al, 1995)**

<b>Tipe Batuan</b>	<b>Nilai Suseptibilitas Maksimum (SI Unit)</b>
<b>Batuan Beku</b>	
Andesit	0,17
Basalt	0,18
Dolorite	0,062
Diabas	0,16
Diorit	0,13
Gabbro	0,09
Norite	0,09
Dacite	0,05
Granite	0,05
Granodiorite	0,062
Peridotite	0,2
Quartz porphyries/Quartz-feldspar porphyries	0,00063
Pyroxenite/Hornblendite	0,25
Rhyolite	0,038
Dunite	0,125
Trachyte	0,051
Monzonite	0,1
Phonolite	0,0005
Spilitics	0,0013
Avg. Igneous Rock	0,27
Avg. Acidic Igneous Rock	0,082
Avg. Basic Igneous Rock	0,12

Lanjutan tabel L 6 Suseptibilitas batuan (Hunt et al, 1995)

<b>Tipe Batuan</b>	<b>Nilai Suseptibilitas Maksimum (SI Unit)</b>
<b>Batuan Sedimen</b>	
Lempung	0,00025
Coal	0,000025
Silt/Carbonates	0,0012
Dolomite	0,00094
Limestone	0,025
Red sediments	0,0001
Sandstone	0,0209
Shale	0,0186
Tuff	0,0012
Conglomerate	0,0012
Arenites/Breccia	0,0012
Avg. Sedimentary Rock	0,05
<b>Batuan Metamorf</b>	
Amphibolite	0,00075
Gneiss	0,025
Granulite	0,03
Acid Granulite	0,03
Basic Granulite	0,1
Phyllite	0,0016
Quartzite	0,0044
Schist	0,003
Serpentine	0,018
Slate	0,038
Marble	0,025
Metasediments	0,024

Lanjutan tabel L 6 Suseptibilitas batuan (Hunt et al, 1995)

<b>Tipe Batuan</b>	<b>Nilai Suseptibilitas Maksimum (SI Unit)</b>
Migmatites	0,025
Charnockite (Pyroxene granulite)	0,03
BIF (Anisotropic) Hematite rich (~7%)	0,25
BIF (Anisotropic) Magnetite rich (>20%)	1,8
Magnetite Skarn	1,2
Avg. Metamorphic Rock	0,073
Magnetite ~ 0,1%	0,0034
Magnetite ~ 0,5%	0,018
Magnetite ~ 1%	0,034
Magnetite ~ 5%	0,175
Magnetite ~ 10%	0,34
Magnetite ~ 20%	0,72

