

**ANALISIS SISTEM PANAS BUMI PADA LAPANGAN “L”
BERDASARKAN INVERSI 2D AUDIOMAGNETOTELLURIK DAN
DATA GEOKIMIA**

(Skripsi)

Oleh

ALWI KARYA SASMITA



**UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
2016**

ABSTRAK

ANALISIS SISTEM PANAS BUMI PADA LAPANGAN “L” BERDASARKAN INVERSI 2D AUDIOMAGNETOTELLURIK DAN DATA GEOKIMIA

Oleh

Alwi Karya Sasmita

Telah dilakukan penelitian di lapangan panas bumi L, menggunakan metode geokimia dan AMT. Tujuan penelitian adalah menganalisis jenis fluida dan menentukan suhu reservoir berdasarkan data geokimia dan menganalisa lapisan bawah permukaan berdasarkan model AMT. Berdasarkan data geokimia, fluida panasbumi “L” termasuk kedalam tipe bikarbonat (HCO_3), suhu reservoir sekitar 284-300°C dengan kedalaman sekitar 2100 m, model 2D inversi AMT pada Lintasan 1 ditafsirkan *caprock* memiliki nilai resistivitas 9-15 Ωm pada dengan ketebalan dari 800 – 1400 m dengan kedalaman 100 - 1400 m dari permukaan, lapisan dengan nilai resistivitas 20 - 50 Ωm di perkirakan merupakan zona reservoir yang berada di bawah lapisan *caprock* dan lapisan reservoir berada pada kedalaman 2100 m dari permukaan dan pada Lintasan 2 lapisan dengan nilai resistivitas 9 - 15 Ωm diduga sebagai *caprock* dengan ketebalan dari titik AMT 10 dan AMT 16 berkisar antara 2500 m – 1000 m sedangkan dari titik AMT 20 dan AMT 24 berkisar antara 100 m – 2400 m, lapisan yang diperkirakan reservoir ini berada pada kedalaman 1200 m -1400 m dari permukaan.

Kata kunci: Tipe fluida, *outflow*, resistivitas, reservoir, *claycap*.

ABSTRACT

ANALYSIS OF GEOTHERMAL SYSTEMS IN THE FIELD “L” BASED ON THE INVERSION 2D AUDIOMAGNETOTELLURIC AND GEOCHEMICAL DATA

By

Alwi Karya Sasmita

The research of geothermal in the field L uses method geochemical and AMT. research purposes analyzing the fluid and temperature reservoir based on geochemical data and analyzing subsurface based on AMT model. Based on geochemical data the geothermal fluid including bicarbonate water (HCO_3), reservoir temperature is about 284-300 °C and depth is about 2100 m, inversion 2D AMT model at the Line 1 indicated caprock have a value resistivity the thickness varies from 800 – 1400 m at the depth 100-1400 m on the surface, layer with resistivity values 20 - 50 Ωm it's estimated that in the reservoir zone under a layers of caprock and in line 2 layers resistivity values 9-15 Ωm suspected as caprock at the thickness varies from AMT 10 and AMT 16 ranged 250 – 1000 m while the point AMT 20 and AMT 24 ranged 100-2400m, layers estimated reservoir is at a depth 1200 m -1400 m on the surface.

Keywords: fluid type, outflow, resistivity, reservoir, claycap.

**ANALISIS SISTEM PANAS BUMI PADA LAPANGAN “L”
BERDASARKAN INVERSI 2D AUDIOMAGNETOTELLURIK DAN
DATA GEOKIMIA**

Oleh

ALWI KARYA SASMITA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**UNIVERSITAS LAMPUNG
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA**

2016

Judul Skripsi : **ANALISIS SISTEM PANAS BUMI PADA
LAPANGAN “L” BERDASARKAN INVERSI 2D
AUDIOMAGNETOTELLURIK DAN DATA
GEOKIMIA**

Nama Mahasiswa : *Alwi Karya Sasmita*

No. Pokok Mahasiswa : 1115051005

Jurusan : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



Pembimbing I

Pembimbing II

Rustadi, M.T.
NIP 19720511 199703 1 002

Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720928 199903 1 001

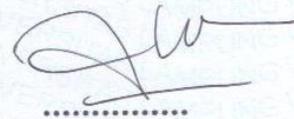
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.
NIP 19720928 199903 1 001

MENGESAHKAN

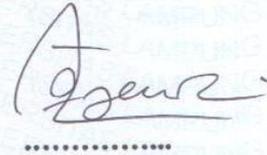
1. Tim Penguji

Ketua : **Rustadi, M.T.**



.....

Sekretaris : **Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**



.....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.**



.....

2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **13 Desember 2016**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Desember 2016



Alwi Karya Sasmita

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Tribudisukur, Lampung Barat pada tanggal 22 Agustus 1993. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Cucu Suryadi dan Ibu Ai Nurhasanah. Penulis telah menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD N 1 Tribudisukur, Lampung Barat pada tahun 2005. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 2 Sumber Jaya, Lampung Barat pada tahun 2008. Dan Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Sumber Jaya, Lampung Barat pada tahun 2011.

Pada tahun 2011 penulis melanjutkan studi di perguruan tinggi dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung. Didalam organisasi jurusan penulis terdaftar sebagai anggota bidang kesekretariatan pada periode 2012/2013 . Pada periode 2013/2014 penulis menjabat sebagai anggota bidang dana dan usaha Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana Universitas Lampung. Anggota SEG (Society of Eksploration Geophysicist) Divisi Internal Student Chapter Universitas Lampung dan anggota AAPG (American Association of Petroleum Geologist) Divisi Fieldtrif Student Chapter Universitas Lampung.

Didalam pengaplikasian ilmu di bidang Geofisika penulis juga telah melaksanakan Kerja Praktik di Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Bandung, pada September hingga Oktober 2015. Pada Desember – Januari 2016 penulis melaksanakan Penelitian Tugas Akhir untuk penulisan Skripsi di Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Bandung selama dua bulan. Hingga akhirnya penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tanggal 13 Desember 2016 dengan skripsi yang berjudul **“Analisis Sistem Panas Bumi Pada Lapangan “L” Berdasarkan Invesi 2D Audiomagnetotellurik dan Data Geokimia.**

PERSEMBAHAN

Aku persembahkan karya ini untuk:

Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW

Ayahanda tercinta Bapak Cucu Suryadi dan Ibunda Tercinta

Ibu Aq Nurhasanah,

Adik-adik ku Tersayang Yukeu Sophia Sasmita dan Arelina

Suryadi Nur.

TEKNIK GEOFISIKA UNIVERSITAS LAMPUNG 2011

KELUARGA BESAR TEKNIK GEOFISIKA UNILA

ALMAMATER TERCINTA UNIVERSITAS LAMPUNG

MOTTO

Ketika rasa takut menghantui anda dan menghalangi anda untuk meraih kesuksesan yang ingin anda capai, maka sakutkanlah hal yang anda takuti tersebut dan rasa takut anda akan hilang di hati anda. (Dedi Corbuzier)

Jika kamu ingin mendapatkan sesuatu di dalam hidup maka kamu harus siap kehilangan sesuatu (Hitam Putih)

**Sometimes we also have to feel the defeat in our lives to achieve* - Alwi Karya Sasmita*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. Atas segala Rahmat dan Hidayahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Analisis Sistem Panas Bumi Pada Lapangan “L” Berdasarkan Inversi 2D Audiomagnetotellurik Dan Data Geokimia”** ini dapat terselesaikan dengan baik dan sebagai syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik di jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, diperlukan saran dan kritik yang dapat membangun untuk perbaikan kedepannya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri maupun pembaca.

Bandar Lampung,..... Desember 2016

Alwi Karya Sasmita

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayahNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul **Analisis Sistem Panas Bumi Pada Lapangan “L” Berdasarkan Inversi 2D Audiomagnetotellurik dan Data Geokimia**. Penulis berharap, karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal serta didukung dengan bantuan dan keterlibatan berbagai pihak ini akan dapat bermanfaat di kemudian hari.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis sadari bahwa banyak pihak yang telah terlibat sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. Allah SWT atas segala berkah dan hidayah yang telah dilimpahkan sehingga penulis bisa menyelesaikan Skripsi ini dengan baik.
2. Kedua orang tuaku tersayang Bapak Cucu Suryadi dan Ibu Ai Nurhasanah terima kasih atas segala dukungan, kasih sayang dan segala perhatiannya
3. Adik – adikku tersayang Yukeu Sophia Sasmitha dan Arlina Suryadi Nur yang memotivasi saya dalam kehidupan ini
4. Kekasihku Elly Yanti yang telah memberikan semangat, doa dan kenyamanan dikala penulis sedang jenuh dengan aktivitas penulis

5. Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Bandung yang telah menerima dan memberikan izin untuk melaksanakan penelitian Tugas Akhir Skripsi
6. Bapak Ahmad Zaenudin S.Si, M.T Sebagai Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus pembimbing II saya.
7. Bapak Rustadi M.T sebagai pembimbing I, terimakasih atas segala bimbingannya.
8. Bapak Syamsurijal Rasimeng S.Si.,M.Si. sebagai dosen penguji skripsi, terimakasih atas segala ilmu yang diberikan.
9. Bapak Dik dik selaku ketua PSDG di bagian Panas Bumi.
10. Bapak Toni Rahadinata dan Bapak Iqbal selaku mentor saya selama melaksanakan Tugas Akhir di PSDG Bandung. Terimakasih atas segala pengetahuan dan pengalamannya berharga yang telah diberikan.
11. Kang Eko, Kang Nurhadi, Kang Izhur, mas Angga, mas Yanmark, mas Yusufi, dan seluruh tim Survei PSDG Bandung, terimakasih atas pengetahuannya.
12. Keluarga besar Teknik Geofisika Universitas Lampung, terutama angkatan 2011 dan para sahabat .Terimakasih untuk semua dukungannya, kasih sayang, dan kebersamaan selama ini.
13. Teman seperjuangan dari Universitas Lampung, Bagus Hardiansyah, terimakasih atas gelak candanya dan konyol bareng di tempat perantauan selama penelitian.
14. Keluarga Bapak kos di Bandung dan Saudara-saudara di Bandung . Terimakasih atas dukungannya selama ini.
15. PPAT(Para Perantau Asal Tribudisukur) terimakasih atas dukungannya

16. Sahabat-sahabatku terimakasih atas dukungan, kalian teman dikala sedih maupun senang.
17. Teman-teman TG 11 ouccch. Achmadi, arenda, agung, alwi, asri, bagus, sibu, dhi, keto, doni, farid, mala, wahyu, guspri, hardeka, nanda, rika, syamsul, wilyan, yunita, hilda, leo, lia, mezzrin, wanda, ami, sari, ticun, rosita, yeni, ucup, ratu, annisa. Kalian sangat luar biasa.
18. Dan semua pihak yang telah ikut membantu dalam pembuatan skripsi ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	2
1.3. Batasan Masalah	2
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Lokasi daerah penelitia	3
2.2. Geologi daerah penelitian	4
2.3. Statigrafi	5
2.4. Manifestasi	7

III. TEORI DASAR

3.1. Sistem panas bumi	10
A. Manifestasi panas bumi	11
3.2. Metode audiomagnetotellurik	14
A. Prinsip dasar AMT	14
B. Asumsi dalam AMT	15
C. Sumber sinyal AMT	15
3.3. Persamaan gelombang elektromagnetik	17
3.4. Metode geokimia	19
A. Kesetimbangan ion	20
3.5. Geoindikator dan <i>tracer</i>	21
3.6. Diagram segitiga CL – SO ₄ – HCO ₃	22
3.7. Diagram segitiga Na – K – Mg	23
3.8. Diagram segitiga Cl – Li – B	24
3.9. Geotermometer	26
A. Geotermometer silika	26
B. Geotermometer Na – K	28
C. Geotermometer Na – K – Ca	29
D. Geotermometer gas	30

IV. METODE PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat	33
4.2. Alat dan Bahan	33
4.3. Pengolahan data AMT	34
4.4. Pengolahan data geokimia	36
4.5. Diagram alir penelitian	37

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil geokimia dan audiomagnetotellurik	38
A. Metode audiomagnetotellurik	38
a. Lintasan pengukuran AMT	38
b. Hasil inversi 2D data audiomagnetotellurik	48
B. Geokimia	44
C. Kesetimbangan ion	46
D. Geoindikator	46
a. Geoindikator CL – SO ₄ – HCO ₃	46
b. Geoindikator Cl – Li – B	49
c. Geoindikator Na – K – Mg	50
d. Geotermometer	52
e. Geotermometer silika	53
f. Geotermometer Na – K	54
g. Geotermometer gas	54
5.2. Analisis dan pembahasan	55

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan	63
6.2. Saran	64

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1. Peta lokasi daerah survei	3
Gambar 2. Peta geologi daerah Pantar, NTT	4
Gambar 3. Stratigrafi daerah penelitian	6
Gambar 4. Interaksi gelombang EM dengan material dibawah permukaan bumi	14
Gambar 5. Sumber sinyal AMT diatas 1 Hz dari <i>lightning activity</i>	16
Gambar 6. Sumber sinyal AMT dibawah 1hz dari <i>Solar wind</i>	17
Gambar 7. Diagram segitiga Cl – SO ₄ – HCO ₃	23
Gambar 8. Diagram segitiga Na – K – Mg	24
Gambar 9. Diagram Cl – Li – B	26
Gambar 10. Diagram kelarutan silika terhadap temperature	27
Gambar 11. Diagram alir penelitian	37
Gambar 12. Model 2D lintasan 1	41
Gambar 13. Model 2D mode TE lintasan 1	41
Gambar 14. Model 2D mode TM lintasan 1	42
Gambar 15. Model 2D lintasan 2	43
Gambar 16. Model 2D mode TE lintasan 2	43
Gambar 17. Model 2D mode TM lintasan 2	44
Gambar 18. <i>Plotting</i> diagram segitiga CL – SO ₄ – HCO ₃	48
Gambar 19. <i>Plotting</i> diagram segitiga Cl – Li – B	50
Gambar 20. <i>Plotting</i> diagram segitiga Na – K – Mg	52
Gambar 21. Kurva kedalaman terhadap temperatur bawah permukaan	55
Gambar 22. Model tentatif Pulau Pantar	60
Gambar 23. Rekonstruksi model sisitem panas bumi daerah “L”	61

DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 1. Persamaan geotermometer silika	28
Tabel 2. Beberapa rumus geometri Na – K	28
Tabel 3. Jadwal penelitian	33
Tabel 4. Data sampel air geokimia	45
Tabel 5. Data sampel gas	45
Tabel 6. Kesetimbangan ion	46
Tabel 7. Hasil perhitungan presentasi konsentrasi CL – SO ₄ - HCO ₃	47
Tabel 8. Perhitungan presentasi konsentrasi Cl – Li – B	49
Tabel 9. Hasil perhitungan presentasi konsentrasi Na – K – Mg	51
Tabel 10. Hasil perhitungan temperature reservoir dengan menggunakan geotermometer air	53
Tabel 11. Hasil perhitungan temperature reservoir dengan menggunakan geotermometer gas	53
Tabel 12. Pengkajian terhadap struktur resistivitas reservoir di Broadlands-Ohaaki	56
Tabel 13. Pengaruh <i>clay</i> dalam batuan terhadap nilai resistivitas	57

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Analisis sistem panas bumi pada lapangan “L” berdasarkan inversi 2D audiomagnetotellurik dan data geokimia terletak di Pulau Panatar, Kabupaten Alor, Nusa Tenggara Timur, lokasi penelitian berada di kompleks Gunungapi Sirung. Keberadaan potensi panas bumi di daerah ini ditandai dengan adanya manifestasi permukaan berupa kolam air panas, fumarol, sulfatara, tanah bertemperatur tinggi dan beberapa kolam air panas telah dijadikan tempat pemandian umum.

Berdasarkan pemaparan di atas, peneliti melakukan analisis sistem panas bumi daerah “L” dengan menggunakan metode audiomagnetotellurik digunakan untuk memetakan kontras resistivitas bawah permukaan (Harinaraya dkk., 2006) dan data geokimia sampel air panas manifestasi daerah “L” digunakan untuk menganalisis jenis fluida panas bumi dan perkiraan suhu reservoir. Survey geologi dilakukan untuk memberikan gambaran mengenai kondisi geologi permukaan di suatu daerah seperti litologi, stratigrafi, serta struktur-struktur yang berkembang di daerah tersebut.

1.2. Tujuan

Tujuan dari penelitian adalah :

1. Menganalisis jenis fluida yang berasal dari manifestasi atau reservoir panas bumi berdasarkan data geokimia
2. Menentukan suhu reservoir panas bumi berdasarkan data geokimia
3. Menganalisa lapisan bawah permukaan berdasarkan model inversi 2D data audiomagnetotellurik.

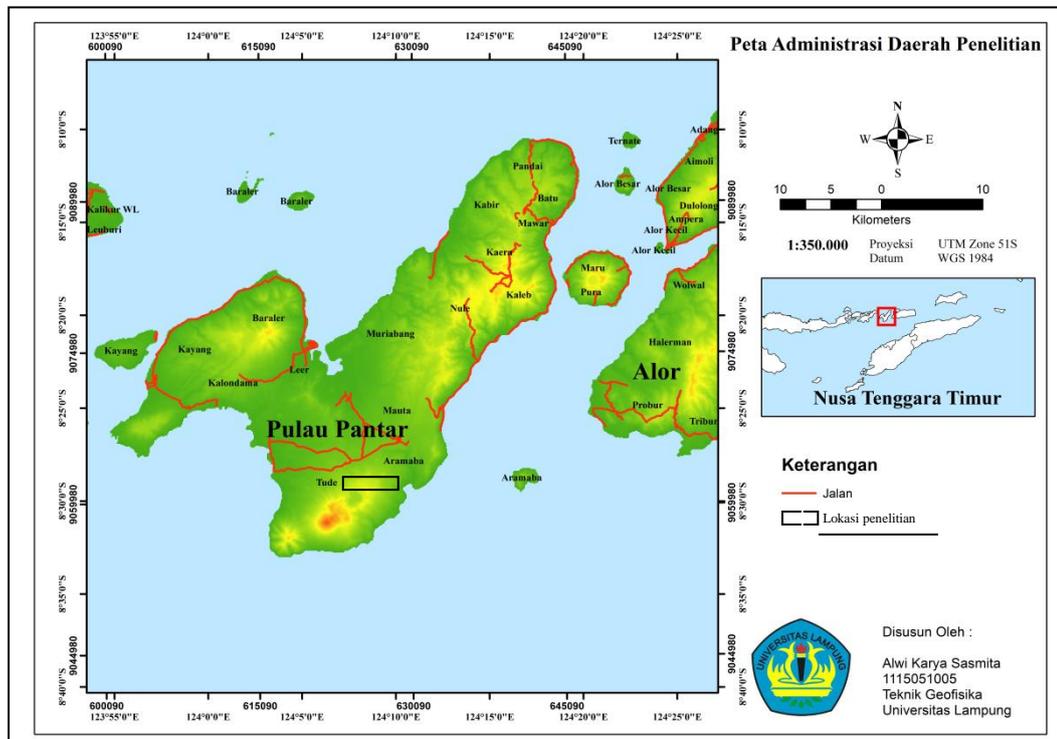
1.3. Batasan Masalah

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer berupa data audiomagnetotellurik dan data sekunder berupa data geokimia dari Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung. Pembahasan dibatasi pada penentuan, penentuan karakteristik fluida panas bumi seperti jenis fluida, pendugaan suhu reservoir berdasarkan analisis data geokimia dan menganalisa lapisan bawah permukaan berdasarkan model inversi 2D audiomagnetotellurik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi daerah penelitian

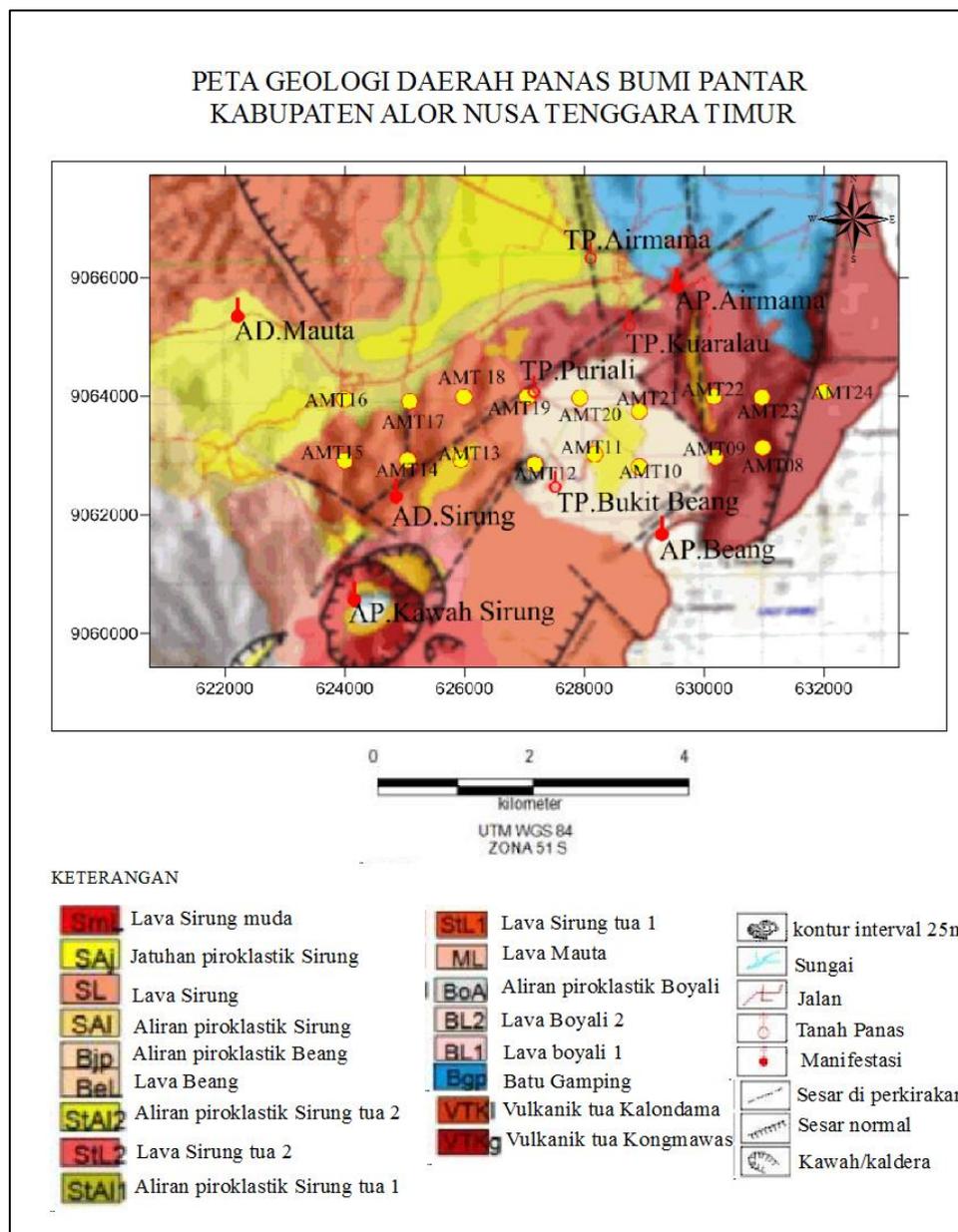
Pulau Pantar secara administratif berada di kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Pulau Pantar berada di sebelah barat dari Pulau Alor yang merupakan pulau utama dari Kabupaten Alor, secara geografis Pulau Pantar terletak pada koordinat $123^{\circ}55'0''$ – $124^{\circ}20'0''$ Bujur Timur dan $8^{\circ}35'0''$ – $8^{\circ}10'0''$ Lintang Selatan atau pada koordinat 600090 – 645090 UTMX dan 9044980 – 9089980 UTM Y dalam UTM (*universal transverse Mercator*) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi daerah survey

2.2. Geologi daerah penelitian

Aktivitas vulkanik tua berumur Tersier akhir terjadi di daerah Pantar pada periode Tektonik Plio-Plistosen (Kusumadinata,1990), batuan vulkanik nampak di bagian timur hingga ke utara dan barat area penelitian yang menghasilkan sesar normal dengan arah utara ke selatan, Gambar 2 menunjukkan peta geologi daerah penelitian.



Gambar 2. Peta geologi daerah Pantar, NTT (Rahadinata dan Takodama, 2015)

2.3. Stratigrafi

Hampir seluruh daerah penelitian panas bumi daerah “L” merupakan batuan produk vulkanik dari umur kuartar hingga tersier yang dapat dipisahkan berdasarkan pusat erupsinya. Beberapa produk gunung api ini terdiri dari aliran lava dan jatuhan piroklastik. Tabel 1 menunjukkan stratigrafi daerah penelitian berdasarkan dari umur kuartar hingga ke umur tersier (Nurhadi dkk, 2015)

1. Satuan vulkanik Boyali berumur kuartar berada dilereng dari tubuh Sirung tua yang terbentuk sebelum erupsi besar dari pembentukan kaldera Sirung yang tersusun atas aliran lava Boyali 1 dan 2 serta aliran piroklastik
2. Satuan lava Mauta berumur kuartar yang menempati bagian selatan dari kaldera sirung dengan ketinggian mencapai 1000 mdpl
3. Satuan vulkanik tua Kongmauwas berumur tersier yang terdapat dibagian timur, didominasi oleh lava basalt kehitaman yang ditindih oleh jatuhan piroklastik (Gambar 2)
4. Satuan vulkanik tua Kalondama berumur tersier yang berada dibagian barat laut yang tersusun oleh lava andesit dan aliran piroklastik. Ditengah area penyelidikan di temukan suatu batu gamping yang menindih vulkanik kongmauwas
5. Satuan vulkanik Sirung tua berumur tersier yang tersusun dari lava Sirung 1 dan 2 serta aliran piroklastik Sirung tua 1 dan 2 menempati bagian utara hingga ketimur daerah penelitian.

Umur	Genesa		Satuan batuan Vulkanik			Sedimen
		Produk	Lava	Aliran	Jatuhan	
	Post	Sirung muda	SML			
KUARTER	Sin	Sirung	SL	SAI	SAJ	
		Beang	BeL			
	Pra	Sirung tua	STL 2	STAR	BJP	
		Mauta	STL 1			
		Boyali	ML	STAR		
			BeL 2			
	BeL 1					
TERSIER	Vulkanik Tua	Batu Gamping		BOAI		BTG
		Kalondama	VTKAI			
		Kongmauwas	VTKG			

Keterangan

SML	= Lava Sirung Muda	SAI	= Aliran piroklastik Sirung
SL	= Lava Sirung	STAR1	= Aliran piroklastik Sirung tua 1
BeL	= Lava Beang	SAJ	= Jatuhan piroklastik Sirung
STL 2	= Lava Sirung tua 2	BJP	= Aliran piroklastik Beang
STL 1	= Lava Sirung tua 1	STAR2	= Aliran piroklastik Sirung tua 2
ML	= Lava Mauta	BTG	= Batu gamping
BeL 2	= Lava Boyali 2	BOAI	= Aliran piroklastik Boyali
BeL 1	= Lava Boyali 1	VTKAI	= Vulkanik tua Kalondama
		VTKG	= Vulkanik tua Kongmauwas

Gambar 3. Statigrafi daerah penelitian

2.4. Manifestasi

Sebaran manifestasi di Pulau Pantar terdapat di beberapa lokasi dan diantaranya berupa tanah bertemperatur tinggi dan manifestasi meliputi air panas kawah Gunung Sirung, air panas Beang, air panas Airmama, air panas Tubbe 1, air panas Tubbe 2, air dingin lereng Gunung Sirung dan air dingin mauta sedangkan tanah bertemperatur tinggi meliputi Bukit Beang, Puriali, Kuaraalau dan Airmama (Dedi, 2015)

1. AP. Kawah Sirung dengan ketinggian mencapai 472 mdpl, di Kawah sekitar fumarol dan solfatar G. Sirung. Air berasa kesat, berbau H₂S sangat kuat, warna hijau pekat, terdapat sublimasi belerang, hembusan gas yang sangat kuat dan kawah berair dengan diameter sekitar 500 x 500 M (Gas GS-1 & 2) dengan temperatur manifestasi 99,89°C, temperature udara 31,5°C dengan pH 0,01
2. AP. Beang dengan ketinggian 0 mdpl dengan air panas muncul di pinggir laut dari lava basalt di Teluk Alitaki. Air Jernih, tidak berbau, rasa asin, ada sinter silika, tertutup air laut ketika pasang, desa Aramaba, Kecamatan Pantar Tengah, dengan temperatur manifestasi 81,05°C, temperatur udara 32,48°C dan pH 6,03
3. AP. Airmama dengan ketinggian 117 mdpl dengan air panas pada lembah curam, jalan dicor, batu2 besar. Air tidak berasa, tidak ada sinter silica maupun karbonat, tidak berbau. Terkontaminasi aktivitas penduduk (MCK). Memiliki temperature manifestasi 58,78°C, temperatur udara 31,50°C dan pH 7,17

4. AP. Tubbe 1 dengan ketinggian 5 mdpl dengan air hangat muncul di pinggir laut dari batuan piroklastik. Air Jernih, tidak berbau, tidak ada sinter silica maupun karbonat, rasa asin, tertutup air laut ketika pasang, desa Airpanas, Kecamatan Pantar Tengah, dengan temperatur manifestasi 37,23°C, temperatur udara 30,99 °C dan pH 6,86
5. AP. Tubbe 2 dengan ketinggian 8 mdpl dengan air hangat muncul di pinggir laut dari batuan piroklastik, berbentuk fasilitas pemandian umum. Dapat terkontaminasi aktivitas manusia (mandi dan mencuci). Air Jernih, tidak berbau, rasa tawar, desa Airpanas, Kec. Pantar Tengah temperatur manifestasi 39,89°C, temperatur udara 33,15 °C dan pH 6,93
6. AD. Sirung dengan ketinggian 547 mdpl dengan mata air dingin di kaki G. Sirung, air jernih, tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, desa Mauta, Kecamatan Pantar Tengah, digunakan sebagai sumber air warga, memiliki temperatur manifestasi 25,62°C, temperature udara 31,35 °C dan pH 6,25
7. AD. Mauta dengan ketinggian 192 mdpl dengan air dingin dari sumur bor, air tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, desa Mauta, Kecamatan Pantar Tengah, memiliki temperature manifestasi 30,65°C, temperatur udara 31,45°C dan pH 6,43
8. Bukit Beang terdapat tanah panas, tidak berbau H₂S, luas 100 x 150 M, temperatur manifestasi 93,5°C, temperatur udara 33,92°C dengan ketinggian 392 mdpl
9. Puriali terdapat tanah panas, tidak berbau H₂S, luas 200 x 300 M, temperatur manifestasi 97,59°C, temperatur udara 34,49°C dengan ketinggian 294 mdpl

10. Kuaralau terdapat tanah panas, tidak berbau H_2S , luas 100 x 200 M, temperatur manifestasi $95,60^{\circ}C$, temperatur udara $33,50^{\circ}C$ dengan ketinggian 103 mdpl
11. Airmama terdapat tanah panas, tidak berbau H_2S , luas 200 x 300 M, temperatur manifestasi $96,70^{\circ}C$, temperatur udara $33,56^{\circ}C$ dengan ketinggian 103 mdpl

III. TEORI DASAR

3.1. Sistem panasbumi

Energi panasbumi adalah energi panas alami dari dalam bumi yang *ditransfer* ke permukaan bumi secara konduksi dan konveksi. Energi panas alami ini berupa *fluida* dengan fasa air atau uap yang terbentuk di dalam *reservoir* panasbumi akibat pemanasan yang dilakukan oleh batuan beku panas dari pembekuan magma sebagai *heat sourceny*a. Energi panas yang dimiliki *fluida* tersebut pada dasarnya berasal dari magma di dalam perut bumi yang merambatkan panasnya secara konduksi memanaskan air di bawah permukaan kemudian membentuk sistem konveksi yang menghasilkan air panas ataupun uap panas.

Untuk dapat memanfaatkan energi panasbumi, dibutuhkan lokasi dengan kondisi geologi tertentu yang memiliki komponen-komponen dari sistem panasbumi. Komponen-komponen tersebut adalah dengan adanya lapisan penutup (*clay cap*), struktur geologi yang umumnya berupa patahan (*fracture*), batuan yang bersifat *permeable* tempat terakumulasinya *fluida* (*reservoir*), sumber panas (*heat source*), dan *fluida* yang berperan untuk menghantarkan panas dari *reservoir* ke permukaan. Keseluruhan komponen tersebut harus dalam satu kesatuan sistem agar sistem panasbumi ini dapat dimanfaatkan secara efektif (Agustomo, 2013).

A. Manifestasi panasbumi

Pengamatan yang mudah dilakukan dalam mencari sumber daya panasbumi adalah dengan adanya manifestasi yang muncul di permukaan bumi. Contoh manifestasi yang muncul pada permukaan antara lain adalah *fumarole*, *hotspring*, *mud pool*, *geyser*.

Manifestasi tersebut dapat muncul di permukaan karena adanya rongga-rongga di sekitar batuan *reservoir* sehingga *fluida* yang terdapat di batuan *reservoir* dapat bergerak menuju permukaan bumi. Terdapat banyak sekali manifestasi yang dapat mengindikasikan adanya sumber daya panasbumi. Manifestasi yang muncul pada permukaan tersebut juga dapat memberikan informasi mengenai tipe dari sistem panasbumi yang ada di bawahnya.

a. *Hot spring*

Hot spring merupakan mata air panas dengan pH netral (6-7). Mata air panas ini diasosiasikan sebagai *direct discharge fluida* dari *reservoir* ke permukaan bumi. Umumnya memiliki kandungan *chloride* yang tinggi sehingga biasa disebut air *chloride*. Mata air panas ini memiliki suhu yang relatif tinggi ($T > 75^{\circ}\text{C}$) sehingga seringkali diselimuti oleh uap panas. Di sekitar mata air panas biasanya terdapat endapan silika sinter dan mineral- mineral sulfida.

b. Silika sinter

Silika sinter adalah endapan dari silica di permukaan yang berwarna keperakan, umumnya terdapat di sekitar mata air panas ataupun lubang *geyser* yang menyemburkan air dan bersifat netral, silika sinter merupakan manifestasi panasbumi di permukaan dari sistem panasbumi yang didominasi air (*liquid dominated system*).

Secara garis besar sistem panasbumi dikontrol oleh adanya sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, lapisan penutup, keberadaan struktur geologi dan daerah resapan air (Goff dan Janik, 2000).

Hochstein dan Browne (2000), mengkategorikan sistem panasbumi menjadi tiga sistem, yaitu :

1. Sistem hidrotermal, merupakan proses transfer panas dari sumber panas ke permukaan secara konveksi, yang melibatkan fluida *meteoric* dengan atau tanpa jejak fluida dari *magmatic*. Daerah rembesan berfasa cair dilengkapi air *meteoric* yang berasal dari daerah resapan. Sistem ini terdiri atas: sumber panas, reservoir dengan fluida panas, daerah resapan dan daerah rembesan panas berupa manifestasi.
2. Sistem vulkanik, merupakan proses transfer panas dari dapur magma ke permukaan melibatkan konveksi fluida magma. Pada sistem ini jarang ditemukan adanya fluida *meteoric*.
3. Sistem vulkanik-hidrotermal, merupakan kombinasi dua sistem di atas, yang diwakili dengan air magmatik yang naik kemudian bercampur dengan air meteorik.

Hochstein dan Soengkono (1997) mengklasifikasikan temperatur suatu sistem panasbumi menjadi tiga berdasarkan temperatur reservoir:

1. Tinggi (temperatur reservoir lebih besar dari 225° C)
2. Sedang/intermediet (temperatur reservoir 125°C hingga 225°C)
3. Rendah (temperatur reservoir lebih kecil dari 125°C)

Sedangkan berdasarkan fase fluida di dalam reservoir, sistem panasbumi terbagi menjadi 2 (Simmons, 1998), yaitu :

1. *Single phase system*

Reservoir mengandung air panas dengan temperatur sekitar 90°C hingga 180°C dan tidak ada pendidihan yang terjadi di reservoir. Reservoir pada sistem ini termasuk sistem panasbumi bertemperatur rendah. Jika reservoir ini dibor, maka yang keluar berupa air karena rekahannya masih sangat tinggi.

2. *Two phase system*

Two phase system terbagi menjadi 2, yaitu :

a. *Vapour dominated system*

Merupakan sistem tertutup dimana sangat sedikit *rechargeable water*, air bisa meresap namun sangat lama akibat berputar-putar di reservoir dan tidak ada *outflow* sehingga mengakibatkan adanya arus konveksi. Hal ini lama-kelamaan akan mengakibatkan batuan reservoir menjadi homogen dan temperatur maupun tekanan fluida menjadi relatif konstan. Fluida di reservoir yang didominasi oleh uap akibat temperatur dan tekanan yang sangat tinggi, menghasilkan manifestasi berupa fumarol dan *acid hot spring*.

b. *Water dominated system*

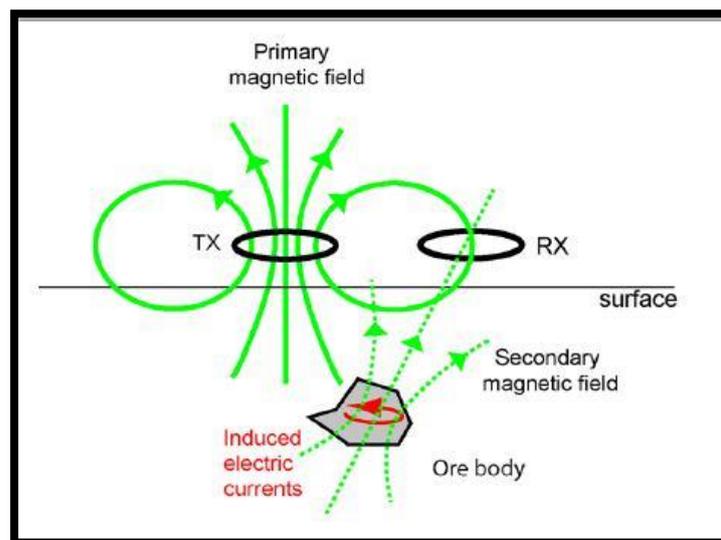
Merupakan sistem terbuka yang mana terdapat *rechargeable water*. Reservoir mengandung air dan uap namun lebih didominasi oleh air. Pada sistem ini terdapat *outflow* sehingga jenis manifestasinya lebih beragam. Adanya *outflow* dan *rechargeable water* membuat energi terlepas sehingga temperatur dan tekanan di reservoir berubah seiring dengan kedalamannya. Semakin dalam kedalamannya maka semakin tinggi tekanannya. Sedangkan temperatur di reservoir memiliki gradien panasbumi yang sangat kecil. Di atas reservoir terjadi arus konduksi sama seperti sistem *vapour dominated*.

3.2. Metode audio magnetotellurik AMT / MT

Metode Audio Magnetotellurik (AMT) / MT merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (B) alami pada arah yang orthogonal dengan arah permukaan bumi dengan tujuan untuk mengetahui *electrical properties of rock* (Daud, 2012).

A. Prinsip dasar AMT / MT

Terbentuknya medan magnet dan medan listrik dalam metode AMT dapat dijelaskan melalui Gambar 4 ketika *transmitter* (TX) yang berupa loop diberi arus listrik, maka di sekitar loop tersebut akan menghasilkan medan magnet dan medan listrik. Arus yang diberikan pada loop tersebut dibuat mati-hidup secara kontinu sehingga akan menimbulkan fluks magnetik di sekitar kawat tersebut. Fluks magnetik ini yang nantinya akan menghasilkan arus induksi pada batuan di bawah permukaan bumi. Arus induksi tersebut yang dinamakan arus eddy. Kemudian arus tersebut akan menghasilkan medan magnet yang akan ditangkap oleh *receiver* (RX) yang ada di permukaan.



Gambar 4. Interaksi gelombang EM dengan material di bawah permukaan Bumi (Unsworth, 2006)

B. Asumsi dalam AMT/MT

Dalam pengukuran AMT untuk mengetahui kondisi bawah permukaan bumi, diterapkan beberapa asumsi yang berkaitan dengan induksi EM yang terjadi (Naidu, 2012), yaitu :

- a. Bumi tidak *generate* medan EM, hanya menyerap energinya dari luar permukaan bumi
- b. Dalam perambatannya, berlaku persamaan Maxwell
- c. Semua gelombang EM dianggap sebagai medan konservatif
- d. Gelombang EM yang dihasilkan dari sistem ionosfer dan relatif jauh dari permukaan bumi, dianggap sebagai medan yang *uniform*, terpolarisasi sebagai gelombang bidang, dan masuk ke dalam bumi pada arah mendekati vertikal
- e. Akumulasi muatan tidak terjadi di dalam bumi yang berlapis. Bumi bertindak sebagai konduktor
- f. Perubahan *displacement current* (D) terhadap waktu dapat diabaikan, dibandingkan dengan variasi arus konduksi. Induksi EM dalam bumi murni merupakan proses difusi
- g. Perubahan permeabilitas magnetik dan permitivitas listrik dari batuan dapat diabaikan (Naidu, 2012).

C. Sumber sinyal AMT

Medan magnet yang terukur di permukaan bumi disebabkan oleh sumber yang berasal dari alam maupun di luar bumi. Sumber medan magnet yang berasal dari dalam bumi disebabkan oleh adanya pergerakan mantel bumi terhadap inti bumi (arus *konveksi*) dan dari sisa medan magnet yang berada di kerak bumi.

Sedangkan sumber medan magnet yang berasal dari luar bumi adalah medan magnet yang terbentuk di atmosfer dan magnetosfer. Antara kedua komponen tersebut memiliki nilai yang bervariasi terhadap waktu dan nantinya dapat digunakan dalam eksplorasi AMT. Frekuensi yang digunakan pada metode eksplorasi dapat dibagi menjadi 2 sumber sinyal frekuensi, yaitu frekuensi tinggi dan frekuensi rendah (Unsworth, 2008).

a. *Lightning activity*, sumber sinyal AMT dengan frekuensi > 1 Hz

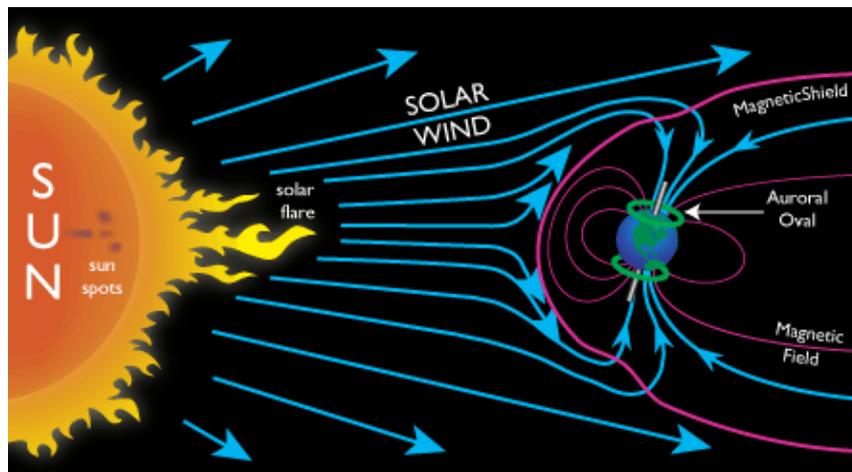
Frekuensi tinggi sinyal AMT (dengan frekuensi diatas 1 Hz) umumnya berasal dari aktivitas vertikal petir atau kilat seperti pada Gambar 5 terjadi di seluruh bagian dunia. Sinyal tersebut menjalar di seluruh bagian dunia di bumi-ionosfer. Sedangkan sinyal diatas 2K Hz tidak dapat merambat dengan baik di ionosfer. Hal ini disebabkan karena amplitude dari gelombang tersebut yang sangat kecil sehingga gelombang tersebut teratenuasi dan tidak dapat terdeteksi (Unsworth, 2008).



Gambar 5. Sumber sinyal AMT diatas 1 Hz dari *Lightning Activity* (Unswort, 2008)

b. Solar Wind, sumber sinyal AMT dengan frekuensi < 1 Hz

Frekuensi rendah pada metode AMT yang berasal dari magnetosfer berkisar dibawah 1 Hz. *Solar wind* merupakan pergerakan ion H dan He, yang berinteraksi dengan medan magnet dari dalam bumi, menyebabkan *solar wind* tersebut dibelokkan sehingga terbentuk magnetosfer seperti pada Gambar 6. (Unsworth, 2008).



Gambar 6. Sumber sinyal AMT dibawah 1 Hz dari *Solar Wind* (Unsworth 2008)

3.3. Persamaan gelombang elektromagnetik

Persamaan Maxwell merupakan persamaan yang didapat dari fenomena listrik-magnet di alam yang dikemukakan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulomb, dan Maxwell. Penggunaan persamaan Maxwell dalam metode AMT menggunakan prinsip gelombang EM yang merambat secara vertikal ke dalam bumi. Gelombang EM diasumsikan sebagai gelombang bidang dan tidak bergantung pada sudut datangnya. Asumsi tersebut berdasarkan karena perbedaan yang sangat kontras antara konduktivitas bumi dengan atmosfer. Nilai konduktivitas medium yang dihasilkan dari pengukuran MT diperoleh dari penyelesaian persamaan Maxwell. Dalam bentuk diferensial, persamaan

Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan pada persamaan (1),

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

dimana: E adalah medan listrik (V/m), B adalah induksi magnet (Tesla), D adalah perpindahan listrik (Coulomb/m²), J adalah rapat arus (Amper/m²), Q adalah rapat muatan listrik (Coulomb/m³).

Selain persamaan Maxwell, pada medium isotropis homogen diaplikasikan persamaan lain agar penyelesaian persamaan medan menjadi lebih sederhana sehingga didapat solusinya. Persamaan tersebut adalah:

$$B = \mu H \quad (2 a)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2 b)$$

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho} \quad (2 c)$$

dimana: μ adalah permeabilitas magnetik (Henry/m), ε adalah permitivitas listrik (Farad/m), σ adalah konduktivitas (Ω^{-1}/m atau Siemens/m), ρ adalah tahanan jenis (Ωm) Dengan asumsi bahwa sifat fisik medium tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi (isotropik homogen) serta perpindahan arus diabaikan, persamaan Maxwell dapat direduksi menjadi:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (8)$$

Apabila dilakukan operasi curl terhadap variabel medan listrik (E) dan medan Magnet (H) maka akan diperoleh persamaan gelombang Helmholtz:

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\nabla^2 H = \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) merupakan persamaan *telegrapher* yang menunjukkan sifat penjalaran gelombang pada medan elektromagnetik, yang mempunyai sifat difusif $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$ dan sifat gelombang akustik $\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)$. Kedua sifat ini penjalarnya tergantung dari frekuensi yang digunakan. frekuensi yang digunakan dalam metode MT/AMT adalah frekuensi rendah (10^{-1} - 10^4 Hz), sehingga sifat yang dominannya adalah sifat difusif. Konsekuensi dari hal tersebut adalah resolusi akan semakin rendah seiring bertambahnya kedalaman.

Dari solusi medan magnet dan medan listrik untuk medium homogeny amplitude gelombang electromagnet mengalami atenuasi secara eksponensial terhadap kedalaman. *Skin depth* didefinisikan sebagai kedalaman suatu medium homogeny dimana amplitude gelombang elektromagnet telah tereduksi 1/e dari permukaan bumi yang dideskripsikan oleh persamaan :

$$\delta \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (11)$$

Dimana ρ sebagai resistivitas bumi dan f sebagai frekuensi gelombang yang digunakan. Persamaan diatas menyatakan bahwa penetrasi kedalaman bergantung pada nilai resistivitas batuan bawah permukaan dan frekuensi yang digunakan.

3.4. Motode geokimia

Tujuan metode geokimia digunakan dalam penelitian eksplorasi panasbumi adalah untuk mengkaji kemungkinan pengembangan sumber daya

panasbumi. Data yang sering digunakan dalam metode geokimia ini adalah data kimia manifestasi air panas, data isotop, data kimia tanah dan gas tanah. Data tersebut digunakan untuk mengkaji kemungkinan pengembangan sumber daya panasbumi yang meliputi berbagai parameter seperti (Hutapea, 2010):

1. Ukuran sumberdaya (*resource size*)
2. Perkiraan temperatur reservoir (*resource temperature*)
3. Permeabilitas formasi (*formation permeability*)

A. Keseimbangan ion

Salah satu cara untuk melakukan evaluasi terhadap kelayakan analisa kimia adalah dengan melakukan pengecekan keseimbangan ion. Hal ini berarti membandingkan konsentrasi molal spesies-spesies bermuatan positif dengan jumlah konsentrasi molal spesies-spesies bermuatan negatif. Kandungan ion-ion bermuatan positif (kation) seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ , Rb^+ , Cs^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , NH_4^+ . Kandungan ion-ion bermuatan negatif (anion) Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , F^- , I^- , Br^- . Serta ion-ion spesies netral SiO_2 , NH_3 , B , CO_2 , H_2S , NH_3 . Untuk mencari keseimbangan ion, terlebih dahulu dilakukan perhitungan meq anion dan kation dengan rumus berikut :

$$M_{\text{eq}} = \frac{\text{konsentrasi (mg/l)} \times \text{bilangan oksidasi unsur}}{\text{Massa atom}} \quad (14)$$

Setelah didapatkan jumlah meq dari seluruh kation dan anion dari unsur dan senyawa di atas, kemudian dilakukan perhitungan keseimbangan ion dengan persamaan berikut ini (Nicholson, 1993).

$$\text{Keseimbangan ion} = \left| \frac{(\sum \text{anion} - \sum \text{kation}) \times 100\%}{(\sum \text{anion} + \sum \text{kation})} \right| \quad (15)$$

Nilai keseimbangan ion dapat bervariasi, tetapi suatu hasil analisis kimia dikatakan layak jika keseimbangan ini tidak lebih dari 5%. Namun tidak berarti bahwa hasil analisa yang mempunyai keseimbangan diatas 5% tidak layak digunakan dalam interpretasi. Mata air panas yang mempunyai keseimbangan ion >5% sangat dipengaruhi oleh tipe dan proses yang dialami tersebut (Nicholson,1993).

3.5. Geoindikator dan *Tracer*

Zat-zat terlarut dibagi dalam dua kategori yaitu geoindikator dan *tracer* (Aribowo, 2011). *Tracer* secara geokimia bersifat inert yang artinya akan sulit bereaksi dengan senyawa lain dan apabila berada dalam fluida panasbumi akan bersifat tetap dan dapat dilacak asal – usulnya. Contoh dari *tracer* ini adalah klorida dan boron. Boron dalam bentuk H_3BO_3 atau HBO_2 merupakan unsur diagnostik yang artinya dapat digunakan untuk melacak asal–usul dari fluida panasbumi. Geoindikator adalah zat terlarut yang bersifat reaktif dan mencerminkan lingkungan ekuilibrium atau keseimbangan, misalnya Na, K, Li, Rb, dan Cs. Konsentrasi Na dan K dikontrol oleh interaksi fluida dengan batuan yang bergantung pada temperatur. Na merupakan kation utama pada fluida panasbumi dengan konsentrasi yang berkisar 200-2000 ppm. Apabila perbandingan Na dengan K semakin kecil maka dapat diinterpretasikan bahwa temperatur semakin tinggi.

Li, Rb dan Cs merupakan unsur yang mudah larut dari batuan. Li, Rb dan Cs merupakan unsur yang sering dipakai bersama Cl dan B untuk karakterisasi fluida. Ketiga unsur ini mudah bergabung dengan mineral sekunder, sehingga

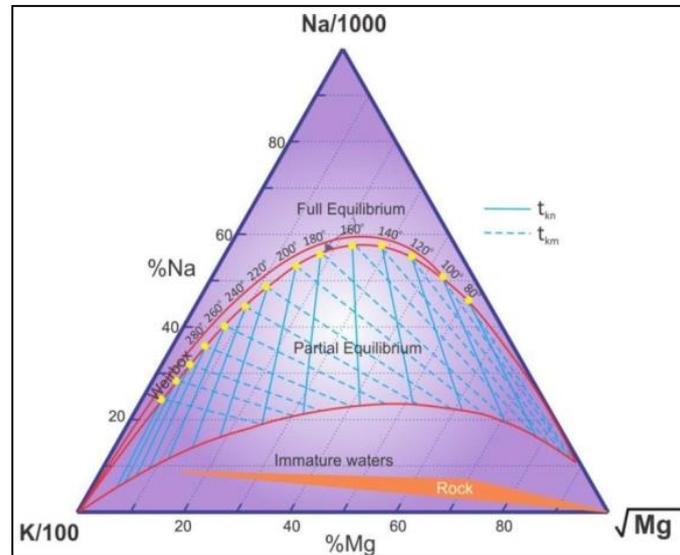
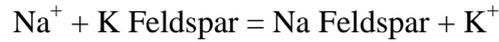
diprediksi semakin jauh jarak migrasi dari fluida ke permukaan maka konsentrasinya akan semakin berkurang. Konsentrasi umum Li berkisar < 20 ppm, Rb < 2 ppm dan Cs < 2 ppm. Li sering terserap oleh mineral klorit, kuarsa dan mineral lempung sehingga pada zona *upflow* rasio B/Li rendah sedangkan pada zona *outflow* rasio B/Li tinggi.

Penggunaan Cl, B, Li, Na, K dan Mg sebagai geoindikator dan *tracer* diterapkan dengan metode sederhana yaitu *plotting* pada diagram segitiga (*ternary plot*). *Plotting* ini merupakan cara yang tepat untuk mengkaji aspek kimia fluida mata air panas maupun fluida sumur panasbumi.

3.6. Diagram segitiga Cl – SO₄ – HCO₃

Penggunaan komponen anion yang berupa Cl, SO₄ dan HCO₃ bermanfaat untuk mengetahui komposisi fluida panasbumi karena anion – anion tersebut merupakan zat terlarut yang paling banyak dijumpai dalam fluida panasbumi. Cl, SO₄ dan HCO₃ dapat digunakan untuk menginterpretasi kondisi dan proses yang berlangsung di dekat permukaan (kurang dari 1km) (Herdianita, dkk., 2006). Konsentrasi Cl tinggi dalam mata air mengindikasikan air berasal langsung dari reservoir, dengan minimal pencampuran atau pendinginan secara konduksi. Kadar Cl rendah pada air (yang tidak menunjukkan karakteristik uap-panas) dari mata air panas adalah karakteristik dari pengenceran air tanah. Konsentrasi dapat berkisar dari <10 sampai >100000 mg/kg, namun nilai-nilai orde 1000mg/kg adalah khas dari klorida-jenis air.

Plotting ke diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 agar mempermudah dalam pengelompokan serta pemeriksa *trend* sifat kimia fluida. Posisi data pada diagram segitiga dapat ditentukan



Gambar 8. Diagram segitiga Na – K – Mg (Simmons, 1998)

Plotting posisi data pada diagram segitiga Na – K – Mg :

$$S = ([\text{Na}]/1000) + ([\text{K}] / 100) + [\text{Mg}]^{1/2} \quad (20)$$

$$\% \text{ Na} = (100([\text{Na}] / 1000))/S \quad (21)$$

$$\% \text{ Mg} = (100 [\text{Mg}]^{1/2}) / S \quad (22)$$

3.8. Diagram segitiga Cl-Li-B

Proporsi relative B dan Cl untuk fluida – fluida dengan asal usul yang sama umumnya tetap. B dan Cl dapat dipakai untuk mengevaluasi proses pendidihan dan pengenceran. Pada T tinggi ($>400^\circ\text{C}$), Cl terdapat sebagai HCl dan B sebagai H_3BO_3 , keduanya relative volatit dan mudah bergerak pada fase uap. HCl dan H_3BO_3 berasal dari *magmatic brine*. Apabila fluida mendingin HCL terkonversi menjadi NaCl, B tetap berada pada fase uap dan Li bergabung pada larutan. Li sering terserap klorit, Qz, dan min lempung, sehingga pada zona *upflow* rasio B/Li rendah sedangkan pada zona *outflow* rasio B/Li tinggi (Aribowo, 2011).

B(boron) bentuk H_3BO_3 atau HBO_2 merupakan unsure diagnostic. Air klorida mata air atau sumur biasanya mengandung 10-50 ppm B. kandungan B yang tinggi (hingga ratusan ppm) biasanya mencirikan asosiasi sistem panas bumi dengan batuan sedimen yang kaya zat organik atau evaporit rasio B/Cl sering dipakai untuk prediksi asal-usul fluida (Nicholson, 1993).

Kandungan relative Cl, Li dan B dapat memberikan informasi mengenai kondisi di bawah permukaan hingga kedalaman sekitar 5 kilometer (Herdianita, 2006). Pengeplotan pada diagram Cl-Li-B yang ditunjukkan pada gambar 14 dapat digunakan untuk menentukan jenis manifestasi termasuk *upflow* atau *outflow*. Kemudian dari perbandingan B/Cl dapat digunakan sebagai indicator kesamaan reservoir.

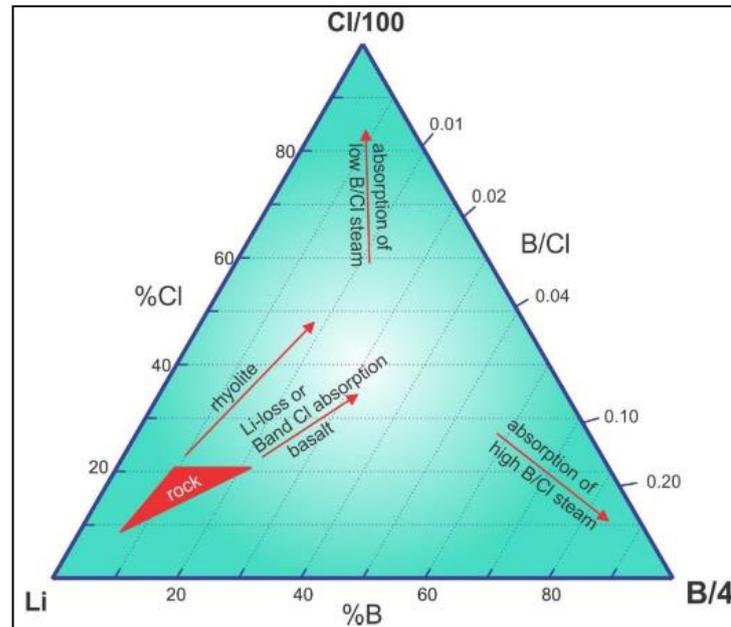
Pengeplotan data pada diagram Cl-Li-B memerlukan factor skala karena adanya perbedaan nilai konsentrasi yang sangat besar diantaranya ketiga komponen tersebut seperti Gambar 9. Perhitungannya sebagai berikut :

$$S = [Cl]/100 + [Li] + [B]/4 \quad (23)$$

$$\%B = (([B]/4)/S) \cdot 100 \quad (24)$$

$$\%Li = ([Li]/S) \cdot 100 \quad (25)$$

$$\%Cl = [Cl]/S \quad (26)$$



Gambar 9. diagram segitiga Cl-Li-B (Simmons, 1998)

3.9. Geotermometer

Geotermometer merupakan cara untuk memperkirakan temperatur reservoir panasbumi yang berdasarkan pada keberadaan zat-zat terlarut pada fluida panasbumi, dimana konsentrasi fluida tersebut sangat bergantung pada temperatur. Tiap geotermometer memiliki keterbatasan sehingga penerapannya harus sangat hati-hati untuk menghindari kekeliruan interpretasi. Berikut adalah beberapa jenis geotermometer.

A. Geotermometer silika

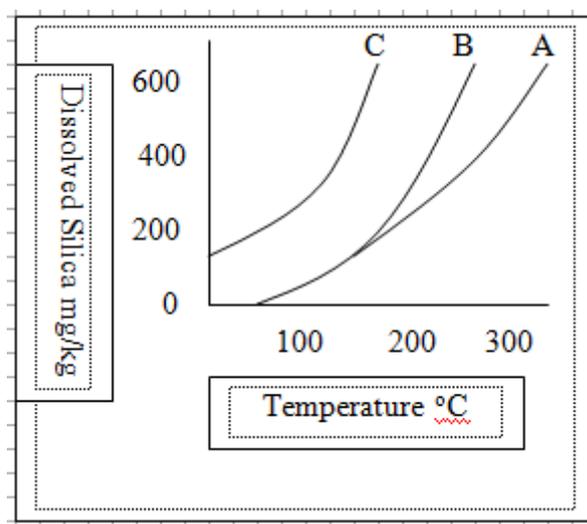
Pada fluida reservoir bersuhu $> 220^{\circ}\text{C}$ kuarsa dapat mengendap akibat pendinginan perlahan, apabila pendinginan berlangsung dengan sangat cepat (misalnya pada mulut mata air) maka yang terbentuk/mengendap adalah silika amorf (Gambar 10) di mana kurva A adalah kelarutan kuarsa tanpa *steam loss*, B koreksi dengan *steam loss* dan C adalah kurva kelarutan silika amorf. Berdasar data simulasi variasi kelarutan atau konsentrasi silika terhadap variasi temperatur seperti pada Gambar 10 maka secara logika kita bisa memperkirakan

temperatur fluida apabila kita memiliki data konsentrasi silika di dalam fluida (dari analisis kimia sampel air). Dari kurva terlihat bahwa pada suhu rendah silika amorf lebih mudah larut daripada kuarsa. Secara umum kelarutan silika dikontrol oleh silika amorf pada T rendah dan kuarsa pada T tinggi.

Suhu batas untuk silika geothermometer cenderung menjadi sekitar 250° C, karena di atas suhu ini silika larut dan mengendap sangat cepat-lebih cepat untuk konsentrasi silika dalam larutan agar tetap konstan sebagai cairan yang dikeluarkan ke permukaan. Geothermometer silika dibuat berdasar kelarutan berbagai jenis silika dalam air sebagai fungsi dari temperatur yang ditentukan dengan eksperimen. Reaksi yang menjadi dasar pelarutan silika dalam air adalah:



Pada kebanyakan sistem panasbumi, fluida di kedalaman mengalami ekuilibrium dengan kuarsa.



Gambar 10. Diagram kelarutan silika terhadap temperature (Aribowo, 2011)

Berbagai jenis persamaan geothermometer silika ditampilkan pada Tabel 1 (hasil simulasi beberapa peneliti), di mana penerapannya sangat tergantung

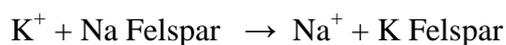
kepada kondisi fluida dan jenis endapan silika yang.

Tabel 1. Persamaan geotermometer silika (Aribowo, 2011)

Geotermometer	Persamaan	Referensi
Quartz-no steam loss	$T = 1309 / (5.19 - \log C) - 273.15$	Fournier (1977)
Quartz-maximum Steam loss at 100 °C	$T = 1522 / (5.75 - \log C) - 273.15$	Fournier (1977)

B. Geotermometer Na-K

Respon rasio konsentrasi Na terhadap K yang menurun terhadap meningkatnya temperatur fluida didasarkan pada reaksi pertukaran kation yang sangat bergantung pada suhu yaitu:



Albit adularia

T >>>> T <<

Penerapan Geotermometer Na-K dapat diterapkan untuk reservoir air klorida dengan $T > 180^\circ\text{C}$. Geotermometer ini punya keunggulan yaitu tidak banyak terpengaruh oleh *dilution* maupun *steam loss*. Geotermometer ini kurang bagus untuk $T < 100^\circ\text{C}$, juga untuk air yang kaya Ca/ banyak berasosiasi dengan endapan travertin. Tabel 2 berikut menampilkan beberapa persamaan geotermometri Na-K.

Tabel 2. Beberapa rumus geotermometri Na-K (Aribowo, 2011)

$T = [855.6 / (0.857 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Truesdell (1976)
$T = [833 / (0.780 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Tonani (1980)
$T = [1319 / (1.699 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$ (250-350 °C)	Arnorsson et al. (1983)
$T = [1217 / (1.483 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Fournier (1979)
$T = [1178 / (1.470 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Nieva and Nieva (1987)
$T = [1390 / (1.750 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Giggenbach (1988)

C. Geothermometer Na-K-Ca

Geothermometer ini diterapkan untuk air yang memiliki konsentrasi Ca tinggi. Geothermometer ini bersifat empiris dengan landasan teori yang belum dipahami secara sempurna (Aribowo, 2011). Batasan teoritis untuk geothermometer ini adalah ekuilibrium antara Na dan K Felspar serta konversi mineral kalsium alumino silikat (misalnya plagioklas) menjadi kalsit. Asumsi yang digunakan untuk membuat persamaan geothermometer Na-K-Ca adalah sebagai berikut:

- a. Ada kelebihan silika (biasanya benar)
- b. Aluminium tetap berada pada fasa padat (biasanya benar karena fluida biasanya miskin Al)

Rumus persamaan untuk geothermometer ini adalah:

$$T = [1647 / (\log (Na/K) + (\log (Ca/Na) + 2.06) + 2.47)] - 273.15 \quad (27)$$

Ada 2 uji untuk menerapkan geothermometer ini:

- a. Jika $[\log \sqrt{Ca/Na} + 2.06] < 0$, gunakan $\beta = 1/3$ dan hitung $T^{\circ}C$
- b. Jika $[\log \sqrt{Ca/Na} + 2.06] > 0$, gunakan $\beta = 4/3$ dan hitung $T^{\circ}C$, jika T terhitung $< 100^{\circ}C$ maka hasil dapat diterima. Jika hasil perhitungan T pada (2) $> 100^{\circ}C$, hitung ulang $T^{\circ}C$ dengan $\beta = 1/3$

Kisaran temperatur yang akurat untuk geothermometer Na-K-Ca adalah $120-200^{\circ}C$, selebihnya tidak terlalu bagus. Keterbatasan lainnya adalah temperatur sangat dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi karena *boiling* dan *dilution*. *Boiling* menyebabkan *loss of CO₂*, terjadi pengendapan kalsit, Ca keluar dari larutan, sehingga T hasil perhitungan terlalu tinggi. Fluida panasbumi dengan $T > 180^{\circ}C$ kebanyakan mengandung sedikit Mg (< 0.2 ppm).

Ketergantungan konsentrasi Mg terhadap temperatur disebabkan oleh pembentukan klorit. Pada T yang lebih tinggi, Mg juga keluar dari larutan karena dipakai untuk membentuk biotit atau aktinolit.

Koreksi Mg diterapkan untuk fluida panasbumi suhu tinggi (>180) yang mengandung Mg terlarut tinggi.

- a. Jika T hasil perhitungan geotermometer <70 °C, tidak perlu koreksi karena fluida pada suhu tersebut tidak mengalami kuilibrium
- b. Hitung $R = [Mg/(Mg + 0.61Ca + 0.31K)] \times 100$
- c. Jika $R > 50$ dianggap bahwa air berasal dari kesetimbangan pada suhu yang lebih rendah (T hampir sama dengan suhu terukur)
- d. Jika $T > 70$ °C dan $R < 50$, gunakan R untuk mencari °T Mg dari grafik koreksi Mg
- e. Hitung T Na-K-Ca terkoreksi dengan cara:
- f. $T_{Na-K-Ca} (koreksi\ Mg) = T_{Na-K-Ca\ terhitung} - °T\ Mg$

Koreksi Mg biasanya diterapkan untuk sistem panasbumi yang relatif “dingin” cocok dipakai untuk mata air-mata air pada kondisi *sub boiling* dengan *discharge rate* tinggi.

D. Geotermometer gas

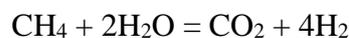
Manifestasi permukaan dikebanyakan lapangan panasbumi terdiri dari fumarol, mata air panas, dan tanah panas (Arnorsson, 2000). Dimana keberadaan air tanah jauh dibawah permukaan, maka mata air panas ini tidak tersedia. Untuk itu geotermometer air tidak dapat digunakan untuk memperediksi temperatur bawah permukaan. Hal ini yang memotivasi para ilmuwan untuk mengembangkan geothermometer gas, diantaranya D’Amore dan Panichi (1980).

Terdapat tiga tipe geotermometer gas yaitu:

1. Keseimbangan gas – gas
2. Keseimbangan gas – mineral
3. Keseimbangan mineral – gas yang melibatkan gas sisa seperti CH₄, H₂S dan H₂

Temperatur bergantung pada keseimbangan gas-gas atau mineral gas yang diyakini untuk mengontrol konsentrasi gas seperti CO₂, H₂S, H₂, N₂, NH₃ dan CH₄ dalam fluida reservoir panasbumi. Berdasarkan sistem CO₂, H₂S, H₂, dan CH₄.

1. Geometer H₂-CO₂ merupakan reaksi kimia paling populer dan banyak digunakan. Geometer ini memiliki keuntungan yaitu bebas dari *buffer* mineral dan kondisi redoks. Pengarus disproporsi hydrogen pada persamaan geothermal, bagaimanapun menunjukkan peranan sebagai geometer hydrogen.



Perhitungan temperatur dilakukan dengan persamaan berikut :

$$T^{\circ}\text{C} = 190.3 + (55.97 \times (\log \text{H}_2 + \frac{1}{2} \log \text{CO}_2)) \quad (28)$$

2. Geometer H₂S-CO₂, menurut Nehring dan D' Amor (1984) dikembangkan berdasarkan data termodinamika gas dan mineral terlarut.

Perhitungan temperatur dilakukan dengan persamaan berikut :

$$T^{\circ}\text{C} = 194.3 + (56.44 \times (\log \text{H}_2\text{S} + \frac{1}{6} \log \text{CO}_2)) \quad (29)$$

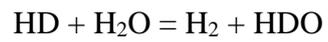
3. Geotermometer H₂S, dirumuskan oleh Arnorrson dan Gunnlaugsson (1985) berdasarkan korelasi dengan temperatur sampel fluida reservoir dari beberapa sistem dominasi fluida. Kemudian, Gigenbech (1997) menyajikan geometer hidrogen sulfida berdasarkan penguraian pirit dan hipotesis pasangan mineral fayalit-hematit, digunakan untuk mewakili *buffer* redoks Fe²⁺/ Fe³⁺, korelasi

ini menyatakan bahwa geometer akan seimbang pada kondisi reservoir setidaknya 250°C.

Perhitungan temperatur dilakukan dengan persamaan berikut :

$$T^{\circ}\text{C} = 246.7 + (44.81 \times \log \text{H}_2\text{S}) \quad (30)$$

4. Geotermometer H_2 dihitung dari persamaan reaksi kimia air dan hidrogen



Perhitungan temperatur dilakukan dengan persamaan :

$$T^{\circ}\text{C} = 277.2 + (20.99 \times \log \text{H}_2) \quad (31)$$

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Lokasi, Waktu dan Judul Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan desember 2015 sampai januari 2016, bertempat di Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Bandung. Data yang digunakan berupa data primer Audiomagnetotellurik dan data sekunder geokimia dan geologi regional daerah panas bumi “L”, Nusa Tenggara Timur. Pengolahan dilakukan di laboratorium PSDG Bandung dan di Laboratorium Teknik Geofisika Universitas Lampung seperti pada Tabel 3 yang merupakan jadwal penelitian.

Tabel 3. Jadwal penelitian

Kegiatan	Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■					
Pengolahan Data	■	■	■	■	■	■	■					
Pemodelan dan Visualisasi				■	■	■	■					
Analisis dan interpretasi					■	■	■	■				
Laporan					■	■	■	■	■	■	■	■

4.2. Alat Dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah

- Data hasil pengukuran Magnetotellurik,
- Data geokimia sampel air dan gas,
- Perangkat lunak : *Microsoft Excel, Mtf24, MT Editor, Winglink*
- Komputer yang kompatibel dengan perangkat lunak yang digunakan.

4.3. Pengolahan Data AMT

Pengolahan data AMT untuk dapat menggambarkan resistivitas bawah permukaan dalam model 2-dimensi dari data *time series* diolah dengan menggunakan 3 *software* yang dikeluarkan oleh Zonge, yaitu *software* mtft24, MTEdit, dan Astatic. *Software* yang digunakan untuk inversi 2-dimensi adalah WinGLink. *software* mtft24 digunakan untuk mereview data *time series*, menentukan data *time series* mana yang akan dipilih untuk dapat diproses selanjutnya, serta menentukan *filtering* yang digunakan dalam *fourier transform*. Pada dasarnya, *software* mtft24 diperlukan untuk membuat *spectral data* dari *time series data*. Karena *spectral data* dapat digunakan untuk menghitung *robust impedance* dan *apparent resistivity averages* pada *software* MTEdit.

Software MTEdit digunakan untuk memproses *spectral data* yang dibuat pada *software* mtft24. Dari *spectral data* tersebut, kemudian dapat dihasilkan kurva *apparent resistivity versus* frekuensi. Setelah itu *robust processing* dapat dipilih dengan menggunakan 2 opsi, yaitu $|Z|$ from Phase Slope atau Use D+ Curve. untuk dapat menentukan apakah menggunakan salah satu opsi tersebut atau tidak sama sekali. Dalam *software* ini, juga dapat melakukan *Quality Control* (QC) data. QC data dilakukan agar rata-rata dari suatu nilai *apparent resistivity versus* frekuensi bernilai sesuai dengan yang diinginkan agar membentuk suatu *trend*.

1. Konversi Spectral Data dari Data Time Series

File tersebut di simpan dengan ekstensi .CAC. file ini masih berupa data *time series*. Dengan *Software* mtft24, data *time series* tersebut kemudian akan dilakukan *fourier transform* untuk mendapatkan koefisien spectral dalam bentuk

file berekstensi .fft. *Spectral data* yang telah diproses setelahnya akan digunakan untuk membuat *robust impedance* dan *apparent resistivity averages* pada *Software* MTEdit. Sebelum *fourier transform* dilakukan, *review time series* dilakukan untuk seleksi awal.

Jika melihat data *time series*, data yang terekam oleh sensor alat Zonge GDP-32 II saat pengukuran AMT pada proses pengukuran adalah data *time series* yang masih tercampur dengan *noise*. Data tersebut tidak bisa langsung diolah dalam proses pengolahan data selanjutnya karena *noise* yang masih ada pada data tersebut akan mempengaruhi hasil data nantinya. Oleh karena itu, perlu menyeleksi data *time series* tersebut agar bebas dari *noise* sehingga data tersebut nantinya dapat diolah dengan baik dan menghasilkan hasil data yang berkualitas baik.

Review time series dilakukan dengan memilih Review TS dan akan muncul jendela respon sinyal dari kelima channel (Ex, Hx, Ey, Hy, Hz) untuk masing-masing data *time series*. Pada mode Review TS terdapat pilihan Skip TS yang digunakan untuk membuang data time-series sehingga data tersebut tidak digunakan dalam proses berikutnya. Pada proses pengolahan data, pertimbangan untuk membuang data terkait dengan kualitas sinyal yang ditangkap.

2. Perhitungan Nilai *Apparent Resistivity* dan *Averaged Impedance*

MTEdit adalah *Software* yang digunakan untuk memproses dan melihat data MT yang didapat dari *receiver* alat Zonge GDP-32 II. *Spectral Data* yang telah dibuat pada *Software* mftt24 akan digunakan untuk menghasilkan kurva *apparent resistivity* dan *averaged impedance* dari setiap titik pengukuran dengan proses *robust averaging*. Kemudian dilakukan evaluasi, *editing* dan QC

data terhadap kurva yang dihasilkan, sehingga didapatkan kurva dengan trend yang *smooth*.

4.4. Pengolahan Data Geokimia

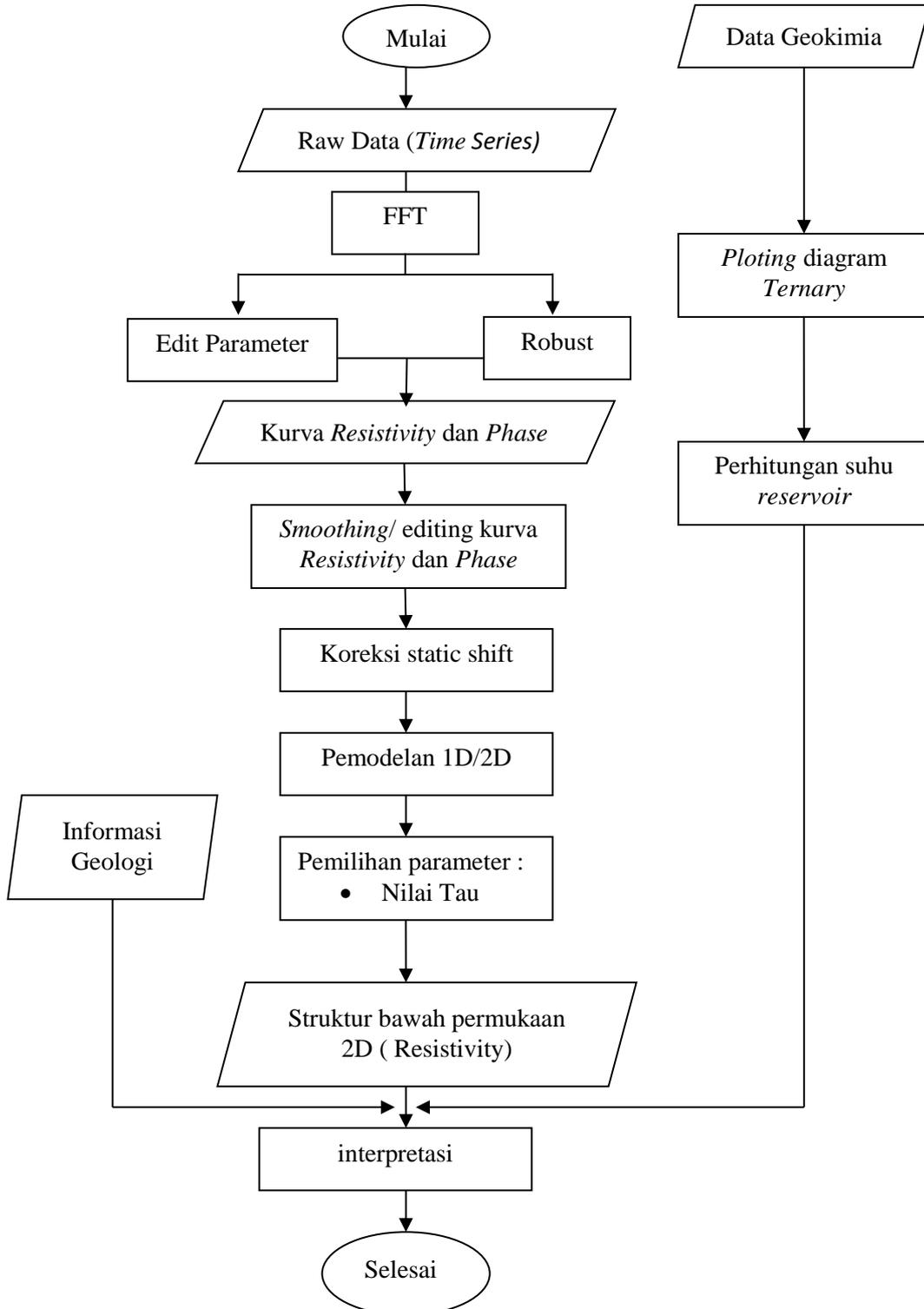
Data geokimia pada penelitian ini berupa data geokimia air dan gas manifestasi. Adapun unsur yang didapatkan adalah Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃, B, SiO₂, dan Li. Gas-gas yang terdeteksi adalah He, H₂, O₂, Ar, Na, CH₄, CO, CO₂, SO₂, H₂S, HCl dan NH₃. Semua data geokimia tersebut dilakukan perhitungan kesetimbangan ion (*ion balance*) untuk melihat kualitas dari data geokimia tersebut sebelum dilakukan pengolahan.

Pengolahan data geokimia dilakukan di *microsoft excel* kemudian dilakukan *plotting* ke diagram *ternary* (Cl-SO₄-HCO₃, Cl-Li-B, Na-K-Mg). Selanjutnya itu dilakukan proses perhitungan pendugaan temperatur bawah permukaan dengan menggunakan geotermometer air dan gas.

4.5. Diagram alir penelitian

Diagram alir yang dilakukan dalam penelitian ini di perlihatkan pada Gambar

11.



Gambar 11. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Analisi yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis Geokimia sampel air manifestasi pada daerah Gunung Sirung merupakan tipe air bikarbonat dengan pH 6 – 7.
2. Tempertur reservoir diperkirakan berkisar 284 - 300°C dan tafsiran berdasarkan kurva kedalaman, reservoir berada pada kedalaman 2100 m
3. Lapisan dengan nilai resistivitas 9-15 Ω m diduga sebagai *caprock*, pada lintasan 1 dengan ketebalan bervariasi dari 800 – 1400 m dengan kedalaman 100 - 1400 m dari permukaan, lapisan dengan nilai resistivitas 20 - 50 Ω m diperkirakan merupakan zona reservoir dan berada dibawah lapisan *caprock*. Lapisan reservoir berada pada kedalaman 2100 m dari permukaan
4. Pada lintasan 2 lapisan dengan nilai resistivitas 9 - 15 Ω m diduga sebagai *caprock* dengan ketebalan dari titik AMT 10 dan AMT 16 berkisar antara 2500 m – 1000 m sedangkan dari titik AMT 20 dan AMT 24 berkisar antara 100 m – 2400 m,

lapisan yang diperkirakan reservoir ini berada pada kedalaman 1200 m - 1400 m dari permukaan

5. Berdasarkan peta geologi lapisan di kedalaman 2100 m merupakan jenis batuan lava Beang dan jatuhan piroklastik Sirung.

6.2. Saran

Adapun saran pada penelitian ini yaitu dengan menambahkan titik pengukuran AMT yang mengelilingi tubuh Gunung Sirung untuk mendapatkan zona reservoir yang akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustomo I., 2013. *Identifikasi sistem panas bumi dengan menggunakan metode AMT dan MT di daerah Simisuh, Pasaman, Sumatra Barat*. Skripsi. Universitas Indonesia. Depok
- Amriyah Q., 2012. *Pemodelan data magnetotellurik multidimensi untuk mendelinesi sistem Geothermal daerah Tawau, Malaysia*, skripsi. Universitas Indonesia. Depok
- Anderson D., dan Gerardo., 2000. *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration* (ed. S. Arnórsson). Vienna, International Atomic Energy Agency. 351p.
- Aribowo Y., 2011. Temperature Prediction Of Geothermal Reservoir with Geothermometer Method, *Journal of Applied Geophysics* – Vol. 32 No.3, 234-236
- Goff dan Janik., 2000. *Encyclopedia of Volcanoes : Geothermal Systems*, Academic Press : A Harcourt Science and Technology Company.
- Harinaryana, T., Abdul, K.K., Murthy, D.N., Veeraswamy, K., Eknath, R.S.P., Manoj, C. dan Naganjaneyulu, K., 2006, *Exploration of Geothermal Structure in Puga Geothermal Field, Ladakh Himalayas, India by Magnetotelluric Studies*. *Journal of Applied Geophysics* 58, 280-295
- Hendro dan Grandis H.,1996. Koreksi Efek Statik Pada Data Magnetotelurik Menggunakan Data Elektromagnetik. *Proceeding Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*: Jakarta.
- Hutapea F., 2010. *Eksplorasi Panas Bumi Dengan Metode Geofisika Dan Geokimia Pada Daerah Bonjol, Kabupaten Pasaman-Sumatra Barat*, Intitut Teknologi Bandung. Bandung.

- Hochstein dan Soengkono S., 1997. *Geothermal Exploration for Earth Scientist*. University of Auckland. New Zealand.
- Hochstein dan Browne., 2000. *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*. In *Encyclopedia of Volcanoes*, H.Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer dan J. Stix (eds.), Academic Press.
- Jones F.W., 1972. *Reply by outhors to discussion by J.F. Hermance*, *Geophysics*,37, p. 541-542
- Naidu G.D., 2012. *Deep Crustal Structure of The Son-Narmada-Tapti Lineament, Central India*. Springer, pp 13-35
- Nicholson K., 1993. *Geothermal Fluids Chemistry And Exploration Techniques*, Springer-Verlag, Berlin.Pedersen, L.B., 1986. *Some Aspects of Magnetotelluric Field Procedures*. 8th Workhsop on Electromagnetic Induction In the Earth and Moon. Neuchatel.
- Nurhadi M., dan Dedi., 2015. *survei geologi dan geokimia daerah panas bumi Pulau Pantar,Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. PSDG : Bandung
- Rahadinata T., dan Takodama I., 2015. *Survei terpadu gaya berat dan audiomagnetotellurik (AMT) daerah panabumi Pantar,Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. PSDG. : Bandung
- Simmons S.F., 1998. *Geochemistry Lecture Note 1998*. University of Auckland, Auckland.
- Stenberg B.K., Washburne J.C., and Pellerin L., 1998. *Correction For The Static Shift in Magnetotelluric Using Transien Elektromagnetic*. *Geophysics*, Vol. 53. No. 11.
- Unsworth and Martyn., 2006. *Electromagnetic and Potential Field Method Geophysics 424*. University of Alberta.
- Unsworth., 2006, *Overview of Electromagnetic Exploration Methods*. University of Alberta.
- Unsworth ., 2008, *Magnetotelluric – Field Techniques*. University of Alberta
- Unsworth ., 2008, *Theory of magnetotellurics over a 2-D Earth*. University of Alberta