

**ANALISIS SISTEM PANASBUMI MENGGUNAKAN METODE
MAGNETOTELLURIK DAN GEOKIMIA DI DAERAH
PROSPEK PANASBUMI WAESANO, NUSA TENGGARA
TIMUR**

(Skripsi)

Oleh
Luthfi Rahmawati
1915051014



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2023**

ABSTRACT

GEOHERMAL SYSTEM ANALYSIS USING MAGNETOTELLURIC AND GEOCHEMICAL METHODS IN WAESANO GEOHERMAL PROSPECT AREA, EAST SOUTHEAST NUSA

By

Luthfi Rahmawati

Indonesia has a large geothermal potential, one of which is Waesano, NTT, which is estimated to have a potential of 121 MWe. It is necessary to conduct further surveys to determine the opportunities for geothermal utilization in Waesano. Therefore, this study aims to analyze the Waesano geothermal system using magnetotelluric, geological, and geochemical data in order to provide information about the subsurface form of the study area. Based on the analysis of the 2-dimensional inversion model of magnetotelluric data combined with geochemical data and geological information, it is known that the geothermal system of the research area consists of a caprock layer that has a resistivity value between 1-38 Ωm and is composed of altered rock. Then the reservoir layer with resistivity between 38-283 Ωm which is composed of carbonate sandstone, and there is allegedly a heat source with resistivity $>283 \Omega\text{m}$. Furthermore, the geothermal fluid obtained is a type of chloride water and sulfate water originating from the reservoir.

Keywords: Geothermal, Magnetotelluric, 2-Dimensional Inversion Model, Geochemistry

ABSTRAK

ANALISIS SISTEM PANASBUMI MENGGUNAKAN METODE MAGNETOTELLURIK DAN GEOKIMIA DI DAERAH PROSPEK PANASBUMI WAESANO, NUSA TENGGARA TIMUR

Oleh

Luthfi Rahmawati

Indonesia memiliki potensi panasbumi yang besar, salah satunya adalah Waesano, NTT yang diperkirakan memiliki potensi sebesar 121 MWe. Perlu dilakukan survei lanjutan untuk mengetahui peluang pemanfaatan panasbumi di Waesano. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem panasbumi daerah Waesano menggunakan data magnetotellurik, geologi, dan geokimia agar dapat memberikan informasi mengenai bentuk bawah permukaan daerah penelitian. Berdasarkan hasil analisis pada model inversi 2 dimensi data magnetotellurik yang digabungkan dengan data geokimia serta informasi geologi diketahui bahwa sistem panasbumi daerah penelitian terdiri atas lapisan *caprock* yang memiliki nilai resistivitas antara 1-38 Ωm dan tersusun atas batuan ubahan. Kemudian lapisan reservoir dengan resistivitas antara 38-283 Ωm yang tersusun oleh batupasir karbonat, serta diduga terdapat heat source dengan resistivitas >283 Ωm . Selanjutnya didapatkan fluida panasbumi merupakan tipe air klorida dan air sulfat yang berasal dari reservoir.

Kata Kunci: Panasbumi, Magnetotellurik, Model Inversi 2 Dimensi, Geokimia

**ANALISIS SISTEM PANASBUMI MENGGUNAKAN METODE
MAGNETOTELLURIK DAN GEOKIMIA DI DAERAH
PROSPEK PANASBUMI WAESANO, NUSA TENGGARA
TIMUR**

Oleh

LUTHFI RAHMAWATI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **ANALISIS SISTEM PANASBUMI MENGGUNAKAN METODE MAGNETOTELLURIK DAN GEOKIMIA DI DAERAH PROSPEK PANASBUMI WAESANO, NUSA TENGGARA TIMUR**

Nama Mahasiswa : **Luthfi Rahmawati**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915051014**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Samsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.
NIP 19730716 200012 1 002

Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T.
NIP 19910207 201803 2 001

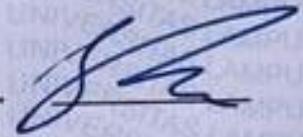
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

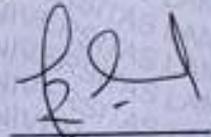
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

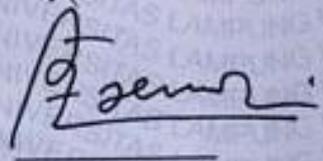
Ketua : Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si.



Sekretaris : Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T.



Anggota : Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP-19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 28 Juli 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi dalam Skripsi dengan judul “Analisis Sistem Panasbumi Menggunakan Metode Magnetotellurik Dan Geokimia Di Daerah Prospek Panasbumi Waesano, Nusa Tenggara Timur” merupakan hasil karya mandiri dan tidak terdapat karya pihak lain yang diakui sebagai karya sendiri.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka, maka saya bersedia diberikan sanksi sesuai dengan peraturan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 08 Agustus 2023



Luthfi Rahmawati
NPM. 1915051014

RIWAYAT HIDUP



Penulis yaitu Luthfi Rahmawati lahir di Sungkai Selatan, Kota Bumi pada 25 Maret 2002. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudari dari pasangan Ayah bernama Sariyanto dan Ibu bernama Lilik Suryani. Penulis juga memiliki satu adik perempuan bernama Lisa Dewi. Alamat penulis yaitu Jl Ethanol, Kampung Warga Makmur Jaya, Banjar Agung, Tulang Bawang, Lampung. Pendidikan yang pernah di tempuh oleh penulis yaitu dari taman Kanak-Kanak (TK) di TK Citra Insani, Dipasena, sekolah dasar (SD) Negeri 2 Tunggal Warga (2007-2013), Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 3 Banjar Agung (2013-2016) dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 1 Banjar Agung (2016-2019) dan pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Selama masa studi penulis pernah menjadi asisten praktikum Metode Geomagnetik dan Analisis Sinyal Geofisika. Penulis aktif mengikuti organisasi kemahasiswaan yang ada seperti: Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana) sebagai anggota bidang Sains dan Teknologi pada periode 2021-2022, Forum Silaturahmi dan Studi Islam (Fossi) Fakultas Teknik Universitas Lampung sebagai staff pada tahun 2020 dan sekretaris departemen Hubungan Masyarakat pada tahun 2021, Seksi Mahasiswa Ikatan Ahli Geologi (SM-IAGI) Universitas Lampung sebagai anggota divisi *Field Trip* pada tahun 2021 dan menjadi bendahara umum pada tahun 2022. Pada tahun 2023 menjabat sebagai ketua divisi MSDM Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia (HMGI) Pusat. Pada bulan Maret 2022 penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi (PSDMBP) dengan judul

“Pengolahan Dan Pemodelan 1 Dimensi Sebaran Resistivitas Bawah Permukaan Berdasarkan Metode Magnetotellurik Pada Daerah Prospek Panasbumi Waesano, Nusa Tenggara Timur” dan penulis memulai Penelitian Tugas Akhir pada Bulan Maret 2023 di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dengan judul penelitian “Analisis Sistem Panasbumi Menggunakan Metode Magnetotellurik Dan Geokimia Di Daerah Prospek Panasbumi Waesano, Nusa Tenggara Timur”. Penulis berhasil lulus dengan gelar Sarjana Teknik pada Juni 2023.

PERSEMBAHAN

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT. atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

AYAH DAN IBUKU TERCINTA

SARIYANTO

&

LILIK SURYANI

Yang telah berusaha dengan keras dan memberikan segala bentuk dukungan, kasih sayang, dan banyak pengorbanan untuk penulis selama ini. Dengan terselesaikannya skripsi ini semoga menjadi langkah awal penulis untuk membahagiakan ayah dan ibu. Saat ini penulis belum bisa memberikan hal lebih, namun penulis berharap dan berdoa agar ayah dan ibu selalu dalam perlindungan Allah, diberikan kesehatan serta umur yang panjang karena segala usaha yang penulis lakukan adalah untuk membanggakan ayah dan ibu.

ADIKKU TERSAYANG

LISA DEWI

Terima kasih atas segala dukungan yang mungkin diberikan kepada penulis tanpa sadar. Lisa adalah salah satu motivasi terbesar penulis dalam menjalani hidup meskipun lebih banyak sisi buruk penulis yang dilihat. Semoga penulis dapat menjadi panutan Lisa untuk menjadi lebih baik dari penulis.

KATA PENGANTAR

Puji syukur diucapkan kehadirat Allah Swt. atas segala rahmat-Nya dan ridha-Nya, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Analisis Sistem Panasbumi Menggunakan Metode Magnetotellurik Dan Geokimia Di Daerah Prospek Panasbumi Waesano, Nusa Tenggara Timur”** dengan sebaik-baiknya. Tidak lupa penulis ucapkan terima kasih terhadap bantuan dari pihak yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis sangat berharap semoga dengan ditulisnya Skripsi ini dapat menambah pengetahuan dan menjadi tulisan yang informatif bagi pembaca. Bagi saya sebagai penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan laporan ini karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman. Untuk itu kami sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi kesempurnaan skripsi ini.

Bandarlampung, 08 Agustus 2023

Penulis

Luthfi Rahmawati
NPM. 1915051014

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah Swt. karena atas rahmat serta karunia-Nya penulis masih diberikan nikmat sehat sehingga dapat menyelesaikan Skripsi ini. Shalawat beriring salam tak lupa penulis hanturkan kepada Nabi agung Muhammad saw yang telah menuntun manusia dari jalan kegelapan menuju jalan yang terang benderang.

Dengan terselesainya Skripsi ini, tentunya tidak luput dari bantuan beberapa pihak yang telah memberikan dukungan serta membimbing penulis dari awal hingga akhirnya Skripsi ini dapat selesai. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis dengan kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT. Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya memberikan jalan, kesehatan, kemudahan dan kekuatan kepada penulis selama pelaksanaan Kerja Praktik hingga terselesainya laporan ini.
2. Kedua orang tua saya terkasih, tercinta, dan terhebat Bapak Sariyanto dan Ibu Lilik Suryani yang telah menjadi penopang, memberikan motivasi, do'a serta segala dukungan baik moral maupun materi selama penulis menempuh studi.
3. Satu-satunya adikku, Lisa Dewi yang selalu memberikan energi positif dan motivasi secara tidak langsung kepada penulis.
4. Bapak Karyanto, S.Si., M.T., selaku ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung atas doa dan dukungan yang diberikan kepada mahasiswa/i nya.
5. Bapak Ikbal Taqodama selaku pembimbing Kerja Praktik di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP) yang telah dengan sabar dan telaten bersedia mengajari penulis dari jarak jauh.

6. Bapak Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing 1 saya di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah banyak meluangkan waktu, memberikan arahan, masukan dan koreksi selama pengerjaan Tugas Akhir.
7. Ibu Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T. selaku dosen pembimbing 2 yang telah membimbing dan memberikan arahan dalam mengerjakan Tugas Akhir.
8. Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku penguji Tugas Akhir atas bimbingannya.
9. Dosen-dosen jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati, terima kasih atas semua ilmu yang diberikan.
10. Teman-teman Teknik Geofisika 2019 dan warga Kost Kita yang telah memberikan bantuan dan dukungan selama pembuatan laporan ini.
11. Kepada diri sendiri yang telah berusaha mempertahankan kewarasan selama pengerjaan Tugas Akhir.
12. Kepada teman-teman penulis yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terima kasih telah memberikan dukungan dan menjadi pendengar keluh-kesah penulis.
13. Rekan-rekan Hima TG Bhuwana, HMGI Pusat, Fossi-FT, terima kasih telah mengisi hari-hari penulis saat kuliah dengan rapat padat yang senang untuk diingat namun tidak untuk diulang.
14. Kepada orang-orang yang pernah memberi warna pada cerita penulis semasa kuliah, terima kasih untuk buang-buang waktunya.
15. Serta seluruh pihak yang terlibat dan tidak dapat penulis tuliskan satu persatu, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandarlampung, 08 Agustus 2023

Penulis

Luthfi Rahmawati
NPM. 1915051014

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRACT	iii
ABSTRAK	iv
HALAMAN JUDUL	v
HALAMAN PERSETUJUAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
PERNYATAAN	viii
RIWAYAT HIDUP	ix
PERSEMBAHAN	xi
KATA PENGANTAR	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lokasi Daerah Penelitian.....	4
2.2 Geologi Daerah Penelitian.....	5
2.2.1 Fisiografi dan Morfologi Daerah Penelitian.....	6
2.2.2 Stratigrafi Daerah Penelitian.....	8
2.2.3 Struktur Geologi Daerah Penelitian.....	10

III. TEORI DASAR	12
3.1 Sistem Panasbumi	12
3.2 Metode Magnetotellurik	14
3.3 Persamaan Maxwell	16
3.4 Tensor Impedansi	17
3.5 <i>Transverse Magnetic</i>	19
3.6 <i>Transverse Electric</i>	20
3.7 <i>Skin Depth</i>	20
3.8 Pengolahan Data Magnetotellurik	22
3.8.1 Transformasi Fourier	22
3.8.2 <i>Robust Processing</i>	23
3.8.3 Seleksi <i>Crosspower</i>	23
3.8.4 Transformasi <i>Bostick</i>	23
3.8.5 Koreksi <i>Static Shift</i>	24
3.9 Pemodelan Inversi 2 Dimensi Magnetotellurik	25
3.10 Geokimia Panasbumi	26
3.10.1 Geoindikator	26
3.10.2 Geotermometer Air	27
3.11 Fluida Panasbumi	27
3.11.1 Air Klorida (<i>Chloride Water</i>)	27
3.11.2 Air Sulfat (<i>Sulfate Water</i>)	27
3.11.3 Air Bikarbonat (<i>Bicarbonate Water</i>)	28
3.11.4 Air Sulfat Klorida (<i>Chloride Sulfate Water</i>)	28
3.11.5 Air Dilute Klorida Bikarbonat	28
3.12 Resistivitas Batuan	28
IV. METODE PENELITIAN	30
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian	30
4.2 Alat dan Bahan	30
4.3 Jadwal Kegiatan Penelitian	31
4.4 Prosedur Penelitian	32
4.4.1 Persiapan Penelitian	32
4.4.2 Pengolahan Data Magnetotellurik	32

4.4.3	Pemodelan Inversi 1D dan 2D Data Magnetotellurik	33
4.4.4	Kajian Data Geokimia	34
4.5	Diagram Alir	35
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	36
5.1	Data Magnetotellurik.....	36
5.2	Pengolahan Data Magnetotellurik	37
5.3	Pemodelan Data Magnetotellurik.....	44
5.3.1	<i>Forward Modelling</i> 1 Dimensi.....	45
5.3.2	Pemodelan Inversi 2 Dimensi.....	48
5.4	Model Inversi 2 Dimensi <i>Line-1</i>	50
5.5	Model Inversi 2 Dimensi <i>Line-2</i>	52
5.6	Analisis Geokimia	54
5.7	Sistem Panasbumi Waesano	59
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	63
6.1	Kesimpulan.....	63
6.2	Saran.....	64

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Lokasi Daerah Penelitian	4
2. Peta geologi daerah penelitian	6
3. Stratigrafi Waesano (Koesmadinata dkk., 1994).	8
4. Stratigrafi daerah penelitian (Ratman dan Yasin, 1978).....	9
5. Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2004).....	13
6. TM mode (Unsworth, 2007)	20
7. TE mode (Unsworth, 2007).....	20
8. Prinsip transformasi fourier (Hediatama dan Dzil, 2011).....	22
9. Diagram alir	35
10. Lokasi akuisisi data magnetotellurik.....	36
11. Tampilan data yang diinput pada SSMT2000.....	37
12. Tampilan TBL <i>multi-table editing</i>	37
13. Tampilan parameter transformasi fourier yang diedit.....	38
14. Proses konversi data <i>time series</i> menjadi fungsi frekuensi	39
15. <i>Robust processing window</i>	39
16. Tampilan saat tahap <i>Process</i>	40
17. Tampilan data MTWS 93 dengan metode <i>Remote Reference</i>	41
18. Tampilan data yang akan diedit saat <i>opening data</i>	42
19. Kurva <i>apparent resistivity</i> dan <i>phase</i> pada data MTWS105 sebelum diedit..	43
20. Kurva <i>apparent resistivity</i> dan <i>phase</i> pada data MTWS105 sesudah diedit...	43
21. Peta elevasi <i>line-1</i>	44
22. Peta elevasi <i>line-2</i>	45
23. <i>Tools</i> yang digunakan untuk <i>Smoothing</i>	46

24. Tampilan data MTWS 91 sebelum dilakukan <i>Smoothing</i>	46
25. Tampilan data MTWS 91 sesudah dilakukan <i>Smoothing</i>	47
26. <i>Forward modelling</i> 1D pada data MTWS 91 dengan mode invariant.....	47
27. Model 1D pada MTWS25	48
28. Tampilan <i>tools</i> pada <i>software</i> winglink	49
29. Tampilan nilai rms pada <i>line-1</i>	50
30. Tampilan nilai rms pada <i>line-2</i>	50
31. Model 2D sebaran resistivitas <i>line-1</i>	51
32. Model 2D sebaran resistivitas <i>line-2</i>	53
33. Diagram segitia Cl-SO ₄ -HCO ₃ (Kusnadi dkk, 2015).....	56
34. Diagram segitiga Na-K-Mg (Kusnadi dkk, 2015).....	57
35. Diagram segitiga Cl-Li-B (Kusnadi dkk, 2015).....	58
36. Tampilan MTWS.90 sebelum diedit	69
37. Tampilan MTWS.90 sesudah diedit.....	69
38. Tampilan MTWS.91 sebelum diedit	70
39. Tampilan MTWS.91 sesudah diedit.....	70
40. Tampilan MTWS.92 sebelum diedit	71
41. Tampilan MTWS.92 sesudah diedit.....	71
42. Tampilan MTWS.93 sebelum diedit	72
43. Tampilan MTWS.93 sesudah diedit.....	72
44. Tampilan MTWS.94 sebelum diedit	73
45. Tampilan MTWS.94 sesudah diedit.....	73
46. Tampilan MTWS.95 sebelum diedit	74
47. Tampilan MTWS.95 sesudah diedit.....	74
48. Tampilan MTWS.96 sebelum diedit	75
49. Tampilan MTWS.96 sesudah diedit.....	75
50. Tampilan MTWS.44 sebelum diedit	76
51. Tampilan MTWS.44 sesudah diedit.....	76
52. Tampilan MTWS.46 sebelum diedit	77
53. Tampilan MTWS.46 sesudah diedit.....	77
54. Model 1D MTWS-44	78
55. Model 1D MTWS-46	78

56. Model 1D MTWS-90	79
57. Model 1D MTWS-91	79
58. Model 1D MTWS-92	80
59. Model 1D MTWS-93	80
60. Model 1D MTWS-94	81
61. Model 1D MTWS-95	81
62. Model 1D MTWS-96	82
63. Model 1D MTWS-105	82
64. Model 1D MTWS-25	83
65. Model 1D MTWS-43	83
66. Model 1D MTWS-71	84
67. Model 1D MTWS-81	84
68. Model 1D MTWS-89	85
69. Model 1D MTWS-97	85
70. Model 1D MTWS-98	86
71. Model 1D MTWS-99	86

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai resistivitas material bumi (Telford dkk, 1990).....	28
2. Jadwal kegiatan tugas akhir	32
3. Karakteristik fluida panasbumi	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah Negara dengan sumber daya yang melimpah, salah satunya yaitu kaya akan sumber daya energi. Sumber daya energi yang dimiliki oleh Indonesia diantaranya seperti batu bara, minyak, dan gas bumi. Akan tetapi, sumber daya energi tersebut memiliki dampak negatif yang besar dalam jangka waktu panjang akibat dari emisi yang dihasilkan. Oleh karena itu, saat ini Indonesia berkomitmen untuk secara perlahan melakukan transisi energi dari *oil & gas* ke *renewable energy* agar kedepannya dapat lebih banyak memberdayakan energi alternatif sebagai salah satu upaya menjaga lingkungan (EBTKE Conex 2020).

Panasbumi merupakan salah satu sumber energi alternatif terbarukan dan sangat berpotensi untuk diproduksi di Indonesia. Hal ini disebabkan Indonesia memiliki lingkaran sabuk gunungapi sepanjang lebih dari 7000 km yang memiliki potensi panasbumi yang besar (Gaffar, dkk., 2007). Proses pencariannya pun cukup mudah jika dibanding sumber daya energi yang lain, karena keberadaan panasbumi ditandai dengan adanya manifestasi di permukaan bumi seperti *fumarole*, *mud pool*, gletser, mata air panas dan masih banyak jenis manifestasi panasbumi lainnya.

Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panasbumi ialah di Waesano, Nusa Tenggara Timur. Berdasarkan Ditjen EBTKE dan Badan Geologi Kementerian ESDM pada tahun 2017 sumber daya panasbumi di daerah Waesano diduga sebesar 121 MWe. Adanya potensi panasbumi di

Waesano ditandai dengan manifestasi diantaranya Danau Waesano yang merupakan Kaldera dan sejumlah mata air panas yang tersebar di sekitar gunung api Waesano.

Pada tahun 2015 pernah dilakukan suatu survei terpadu di daerah Waesano oleh Kelompok Penyelidikan Panasbumi, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi (PSDMBP) untuk mengetahui kondisi bawah permukaan daerah prospek panasbumi Waesano dengan melakukan pengamatan geologi dan geokimia. Berdasarkan survei tersebut didapatkan struktur rekahan dan juga lapisan reservoir panasbumi. Selanjutnya pada tahun yang sama dilakukan pengamatan untuk mengetahui batas area prospek panasbumi Waesano menggunakan pendekatan geofisika metode *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) oleh Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi (PSDMBP). Akan tetapi, belum pernah dilakukan penelitian untuk mengetahui sistem panasbumi dan karakteristik fluida panasbumi di daerah Waesano dengan menggunakan pendekatan geofisika, geologi, dan geokimia.

Penelitian ini melakukan pengamatan geofisika dengan menggunakan metode magnetotellurik karena jangkauan penetrasinya yang lebih baik dibandingkan metode geofisika lainnya. Dengan melakukan pemodelan inversi 2-D pada data magnetotellurik, dapat diketahui gambaran sistem panasbumi berdasarkan sebaran nilai resistivitasnya. Dalam komponen sistem panasbumi salah satu diantaranya ialah terdapat reservoir, dengan menggunakan data geokimia maka dapat diketahui komposisi kimia dari fluida panasbumi sehingga dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik reservoir panasbumi. Data geokimia dan geologi dapat digunakan untuk mendukung data geofisika dalam memvalidasi keberadaan sistem panasbumi di daerah penelitian. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis data magnetotellurik dan geologi untuk mengetahui sistem panasbumi dan kajian data geokimia untuk mengidentifikasi karakteristik reservoir

panasbumi pada daerah prospek yang terletak di Waesano, Nusa Tenggara Timur.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengolahan data magnetotellurik hingga pemodelan inversi 1 dimensi dan 2 dimensi.
2. Melakukan interpretasi berdasarkan sebaran nilai resistivitas yang ditunjukkan pada model inversi 2 dimensi data magnetotellurik.
3. Mengidentifikasi karakteristik reservoir berdasarkan data geokimia fluida panasbumi.
4. Melakukan analisis sistem panasbumi dengan menggabungkan hasil pengamatan data geofisika, geologi, dan geokimia.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Pengolahan dan pemodelan inversi 1D dan 2D pada data magnetotellurik hingga diperoleh model penampang dengan nilai rms terendah.
2. Mengidentifikasi komponen sistem panasbumi berdasarkan sebaran nilai resistivitas pada model inversi 2 dimensi data magnetotellurik.
3. Menganalisis karakteristik panasbumi dengan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg, dan Cl-Li-B.

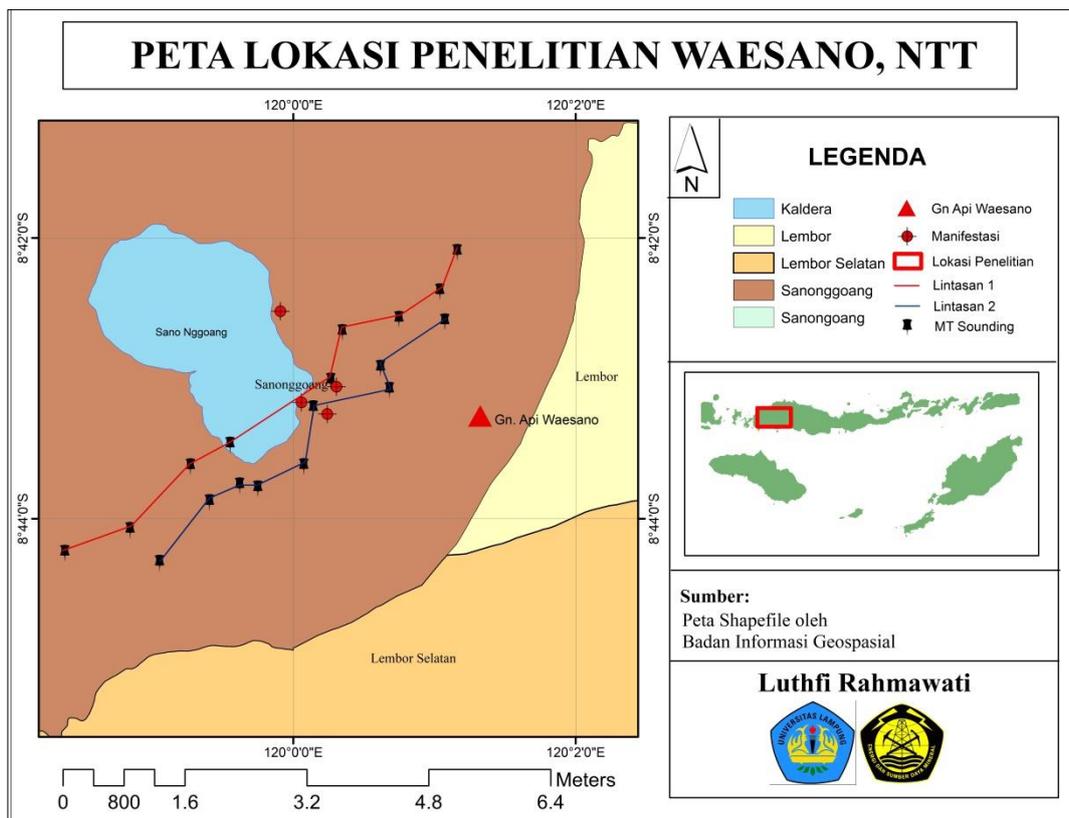
1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu memberikan informasi mengenai pengolahan hingga pemodelan inversi 1D dan 2D untuk data magnetotellurik serta informasi mengenai sistem panasbumi di daerah prospek panasbumi Waesano berdasarkan pengamatan geofisika, geologi, dan geokimia sebagai referensi sebelum dilakukan pemanfaatan lebih lanjut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

Secara administratif, lokasi daerah penelitian berada di Desa Wae Sano, Kecamatan Sano Nggoang, Kabupaten Manggarai Barat, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Secara geografis, berada pada $8^{\circ}42'54.9''S$ $120^{\circ}00'37.5''E$. Penelitian dilakukan di sekitar daerah munculnya manifestasi seperti kaldera dan mata air panas dengan melakukan pengukuran magnetotellurik sebanyak 2 lintasan, seperti pada **Gambar 1**.

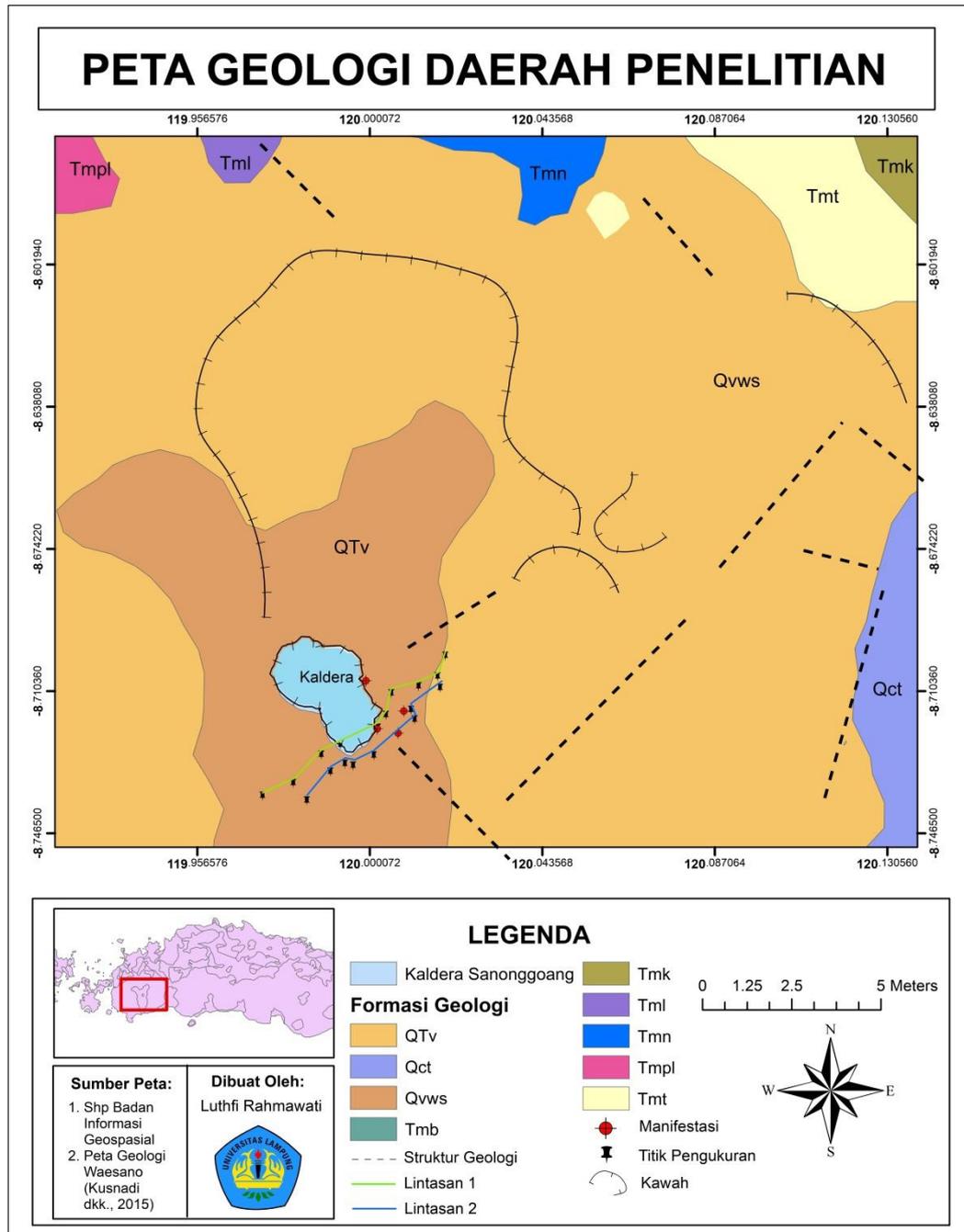


Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian.

2.2 Geologi Daerah Penelitian

Lokasi penelitian berada pada lingkup area vulkanik dengan batuan hasil alterasi seperti Halloysit, kalsit, montmorilonit, kaolinit, pyrophyllite, illite, paragonite, dicklite, K - Na Alunite, paligorskite, gypsum, diaspore, dan jarosite. Adapun struktur vulkanik pada daerah penelitian terdiri dari kaldera yang terdapat di Mbeliling, Depresi di Golo Leleng, Depresi di daerah Waemunting, Kawah sekitar Sano Nggoang. Struktur yang berarah dari Baratlaut ke Tenggara terdapat Sesar yaitu Poco Dedeng, Sesar Tantong, Sesar Watuwangka, Sesar Ndaring, dan Sesar Werang. Lalu struktur yang berarah dari Baratdaya ke Timurlaut diantaranya Sesar Taal, Sesar Lempe, Sesar Nampar. Adapun struktur utama yang mengontrol daerah Waesano diantaranya sesar normal Namparpacing, sesar normal Wae Racang (Bobo) dan kaldera Waesano (Kusnadi dkk., 2015). Hasil erupsi gunung Waesano yang terutama terdiri dari tufam tufa dengan pasir dan tufa dengan batupung yang putih dan mudah remuk. Di sekitar gunung Waesano juga ditemukan pula beberapa singkapan kecil yang terdiri atas lava dan breksi berupa andesit piroksen, andesit berongga dan basalt.

Sekitar daerah penelitian, tersusun atas satuan Batugamping berlapis (Tml) dengan ciri memiliki warna kelabu, berbentuk pejal, mengandung sisipan-sisipan batugamping tufaan, batugamping kwarsa, tufa, dan konglomerat. Satuan ini ditutupi selaras oleh batugamping tufaan (Tmpl), dan dialasi dengan tidak selaras oleh batuan gunung api (Tlmv) (Ratman dan Yasin, 1978). Kemudian terdapat satuan formasi bari (Tmb) tersusun atas batugamping yang berselingan dengan batugamping pasir. Formasi nangapanda (Tmn) yang tersusun atas batupasir dan batugamping. Formasi tanahau (Tmt) yang bersusun atas lava, breksi, dan tuf, berwarna kelabu kehijauan dengan susunan dasit dan struktur bantal. Adapun formasi kiro (Tmk) tersusun atas breksi, lava, dan tuf dengan sisipan batupasir tufan (Koesmadinata dkk., 1994).



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Modifikasi Kusnadi dkk., 2015).

2.2.1 Fisiografi dan Morfologi Daerah Penelitian

Pulau Nusa Tenggara adalah kepulauan yang berada di antara dua jalur genatikal hasil dari perluasan busur banda di sebelah barat. Pulau-pulau yang berada di kepulauan Nusa Tenggara terletak di dua buah jalur genatikal yang juga merupakan pelebaran dari busur Bandar di bagian barat. Genatikal yang membujur dari timur hingga pulau

Wetar, Romang, Pantar, Alor. Kambing, Lomblen, Adonara, Solor, Rinca, Flores, Komodo, Bali, Sumbawa, dan Lombok. Lalu di bagian selatan tertentu oleh pulau Dana, Roti, Sawu, Timor, dan Raijua. Punggungan genetiklinial bercabang di daerah Swawu, yang mana salah satu cabangnya membentuk sebuah ambang yang turun ke laut dan melewati Raijua dan Dana kemudian berakhir ke arah punggungan bawah laut yang berada di selatan Jawa. Adapun cabang lain ialah rantai penghubung dengan busur dalam yang melintasi daerah di dekat sunda (Bemmelen, 1949).

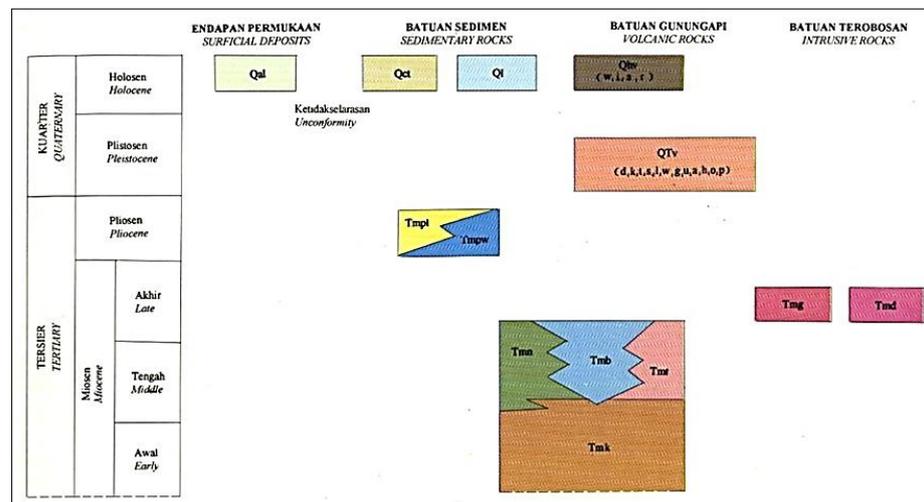
Menurut Ratman dan Yasin (1978), diduga bahwa pusat-pusat erupsi adalah kerucut Doro Lambuwu (QTvl), Doro Maria (QYvm), Doro Saboke (QTvs), Gilibanta (QTvg), Doro Otota (QTvd), Doro Orora (QTvo) dan gunung Beliling (QTv2). Di sekitar daerah penelitian terdapat gunungapi yang masih aktif yaitu gunung Sangeang Api di pulau Sangeang dan gunung Waesano di pulau flores. Kedua gunung tersebut merupakan gunungapi strato. Pada puncak gunung Sangeang Api terdapat tiga kerucut utama dan beberapa kawah sedangkan di bagian tengah gunung Waesano terdapat satu danau kawah yang berbentuk lingkaran dan memiliki diameter sekitar 2,5 km. Di sekeliling gunung Waesano ditemukan beberapa manifestasi seperti pada **Gambar 2.**

Morfologi di daerah penelitian dibedakan menjadi satuan tubuh Mbeliling curam di bagian utara, satuan tubuh Watuwanga Curam di bagian timur laut, satuan tubuh Golo Leleng bergelombang di bagian timur, satuan puncak Poco Dedeng curam, satuan tubuh Poco Dedeng bergelombang, satuan kaki Poco Dedeng landai di bagian selatan, satuan tubuh Sano Nggoang curam di bagian tengah, satuan Kaki Ranaka landai di bagian tenggara. Pada bagian barat pulau Flores, hampir sama morfologinya dengan pulau Komodo dan pulau Rinca yang dapat dibedakan atas daerah bagian utara dan daerah bagian

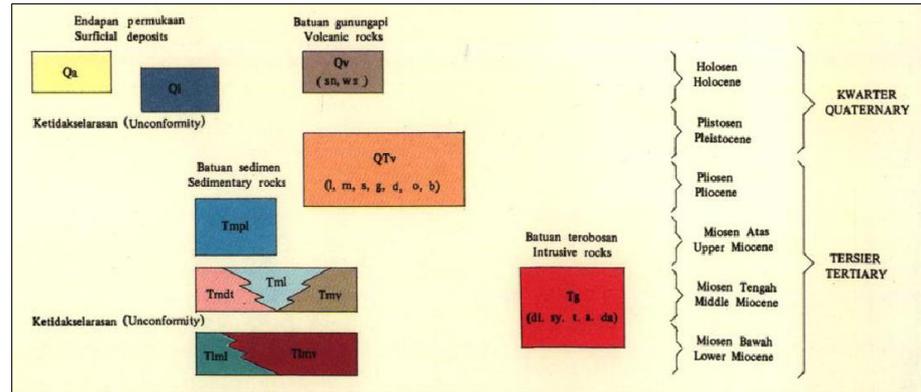
selatan. Daerah bagian utara berbentuk bukit-bukit yang berpuncak hampir datar. Batuannya terdiri dari batuan gunungapi dan sedimen yang berumur Tersier. Pola aliran sungainya mendaun, lembah-lembahnya lebar dan lerengnya landau. Tumbuhannya sebagian besar terdiri dari semak belukar. Sedangkan daerah bagian selatan dibentuk oleh satu gunung kerucut yang mana batuannya terdiri dari hasil gunungapi tua. Pola aliran sungainya memancar dan lembah-lembahnya berbentuk “V”. Sebagian besar daerahnya ditutupi oleh hutan lebat (Ratman dan Yasin, 1978).

2.2.2 Stratigrafi Daerah Penelitian

Stratigrafi daerah Waesano ditentukan berdasarkan umur batuan tertua hingga produk erupsi termuda seperti pada **Gambar 2.**, dengan urutan sebagai berikut: Satuan batupasir, Satuan vulkanik Mbeliling, Satuan vulkanik Ranaka, Satuan Vulkanik Poco Dedeng, Satuan Vulkanik Golo Tantung, Satuan Vulkanik Golo Leleng, Satuan Lava Golo Kempo, Satuan Lava Golo Tanadeng, Satuan Vulkanik Sano Nggoang, dan Endapan sekunder/ longsoran (EBTKE dan Badan Geologi, 2017).



Gambar 3. Stratigrafi daerah penelitian (Koesmadinata dkk., 1994).



Gambar 4. Stratigrafi daerah penelitian (Ratman dan Yasin, 1978).

Satuan batupasir, satuan ini diindikasikan sebagai satuan tertua yang diduga sebagai batuan dasar yang menyusun lapisan di daerah penelitian. Tebal dari lapisan batupasir yang terletak di bagian timur laut yakni 50 m. Satuan vulkanik yang berada di Mbeliling, didominasi oleh batuan gunungapi dengan jenis ignimbrite, aliran ignimbrite, aliran piroklastik dan piroklastik dan lava riolit. Ignimbrite berwarna kelabu keputihputihan dan keras, membentuk dinding terjal dan berpotensi terhadap longsor. Satuan Vulkanik selanjutnya berada di Ranaka, membentuk morfologi kaki Ranaka yang menyebar di area sebelah utara ditunjukkan oleh relief halus dan landau. Disusun oleh batuan diantaranya jenis laharik dan batuan piroklastik bertekstur halus yang memiliki susunan lapilli berupa lava andesit.

Satuan gunungapi selanjutnya yaitu Poco Dedeng, satuan ini terletak di selatan dan terbagi atas tiga satuan batuan, diantaranya, aliran piroklastik poco dedeng 1 dan 2, serta lava poco dedeng. Morfologi yang dihasilkan berupa bagian vulkanik dan ditempati oleh batuan lava dasit abu-abu terang sedikit putih, porfiritik, vesicular serta di beberapa tempat menunjukkan adanya kekar berlembar/*heating joint*. Satuan Vulkanik selanjutnya yakni Golo Tantong, bertempat di arah timur laut dengan morfologi yang bergelombang atau curam. Tersusun atas batuan vulkanik berjenis lava basalt lalu pada beberapa lokasi ditemukan aliran piroklastik. Satuan berikutnya yaitu vulkanik Golo Leleng, berlokasi di bagian tenggara dari Kaldera Sanonggoang,

menghasilkan morfologi yang curam ke dalam dan terdapat depresi di Waemunting yang melebar ke bagian selatan. Tersusun atas batuan vulkanik dengan jenis lava andesit.

Satuan Lava Golo Kempo, tersebar pada arah selatan dari Golo Tandong dan menghasilkan morfologi daerah yang curam diikuti depresi Golo Leleng membelah ke arah timur. Tersusun atas batuan vulkanik dengan jenis lava basalt berwarna kehitaman dengan tekstur *columnar joint*, tersingkap di sekitar area dari Bambor menuju ke Lembor. Satuan Lava Golo Tanadeng, tersingkap di sebelah tenggara dari daerah Sanonggoang, terbentuk morfologi yang curam dengan susunan batuan berupa lava dan aliran piroklastik. Lava yang dicirikan warna abu-abu kemerahan tersilisifikasi, masif dan teroksidasi. Sedangkan aliran piroklastik yang memiliki warna kecoklatan tersebar menyusun depresi di wilayah timur dan berhenti di sekitar Lengkongkayu. Terakhir Satuan Vulkanik di Sanonggoang, terletak pada wilayah selatan daerah penelitian ditunjukkan dengan morfologi perbukitan curam hingga bergelombang.

2.2.3 Struktur Geologi Daerah Penelitian

Pengelompokan struktur geologi di daerah penelitian terbagi atas sesar yang terbentuk oleh proses vulkanisme (Kusnadi dkk., 2015). Adapun jenis-jenis struktur geologi yang berada di sekitar daerah Waesano sebagai berikut (**Gambar 2.**):

1. Struktur Vulkanik

Struktur ini tampak pada bagian depresi vulkanik Mbeliling saat terjadinya pembentukan kawah Sanonggoang yang berbentuk ellipsoid diduga merupakan produk letusan yang bersifat asam. Seperti Depresi Golo Leleng, Depresi Waemunting, Kaldera Mbeliling, dan Kawang Sanonggoang.

2. Struktur Berarah Baratlaut-Tenggara

Terdapat struktur geologi berupa sesar yang merupakan hasil dari aktivitas tektonik regional. Sesar Poco Dedeng yang menjadi penyebab munculnya Kaldera Sanonggoang. Dugaan adanya sesar ini divalidasi oleh munculnya manifestasi berupa mata air panas silica residu. Adapun jenis sesar lainnya yaitu sesar Tantong dan sesar Watuwangka yang menjadi pembatas antara batuan sedimen dengan produk vulkanik Golo Tantong. Struktur ini ditunjukkan oleh adanya mata air panas dan sinter karbonat dengan jumlah yang besar di Golo Larang. Struktur geologi lainnya adalah sesar Ndaring dan sesar Werang.

3. Struktur Berarah Baratdaya-Timurlaut

Struktur geologi yang muncul pada arah ini ditunjukkan dengan kelurusan sesar yang berarah sebaliknya dan disebut antitetik. Terdapat Sesar Lempe dan Sesar Nampar yang menyebabkan munculnya manifestasi air panas Nampar Making, serta Sesar Taal yang memiliki hubungan dengan depresi Waemunting.

III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panasbumi

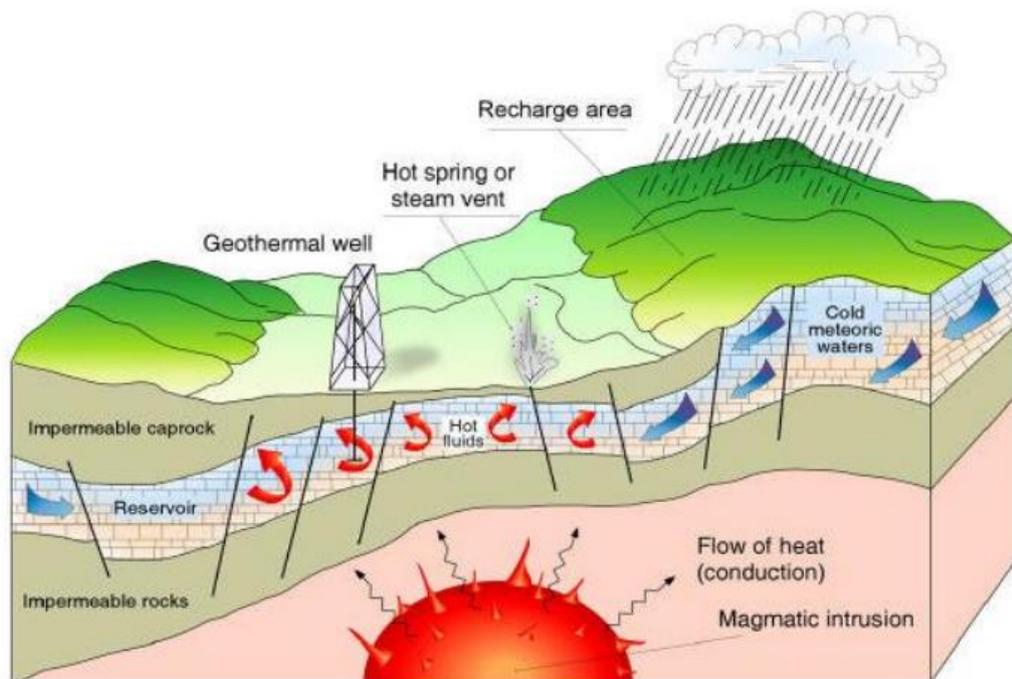
Energi panasbumi adalah energi panas alami dari dalam bumi yang ditransfer ke permukaan bumi secara konduksi dan konveksi. Sistem panas bumi merupakan perpindahan panas alami dalam volume tertentu dari kerak bumi dari sumber panas ke tempat pelepasan panas, yang umumnya adalah permukaan tanah. Komponen sistem panasbumi yang lengkap terdiri dari tiga komponen utama, yaitu adanya batuan resevoir yang *permeable*, adanya air yang membawa panas, dan sumber panas itu sendiri. Komponen-komponen tersebut saling berkaitan dan membentuk sistem yang mampu mengantarkan energi panas dari bawah permukaan hingga ke permukaan bumi (Hochstein dan Browne, 2000).

Panas yang ada di dalam bumi ditimbulkan oleh reaksi nuklir fusi pada inti bumi. Peluruhan isotop radio aktif seperti potasium, uranium, dan thorium secara terus menerus menghasilkan panas dari dalam bumi. Panas itu kemudian berdifusi hingga ke permukaan bumi. Difusi panas yang berupa *heat transfer* terjadi melalui beberapa cara yaitu konveksi dan konduksi. Transfer panas di bawah litosfer kebanyakan melalui konveksi dan di litosfer melalui konduksi (Gupta dan Ray, 2007).

Manifestasi permukaan adalah tanda-tanda alam yang nampak dipermukaan sebagai petunjuk awal adanya aktivitas panas bumi di bawah permukaan tanah. Bentuk manifestasi permukaan antara lain berupa *hot spring* (mata air

panas), *ground warm* (permukaan tanah yang hangat), *fumarole* (gas panas yang keluar dari tanah). Warna kuning yang ada disekitar *fumarole* disebabkan oleh akumulasi kristal sulfur atau belerang sebagai akibat proses pendinginan uap sulfur saat uap itu keluar dari lubang dan bersentuhan dengan udara bebas yang temperaturnya lebih dingin dibanding dengan temperatur dibawah tanah. Akumulasi kristal sulfur tersebut dinamakan solfatara (Suparno, 2009).

Komponen dari sistem panasbumi yang lengkap terdiri atas 3 komponen utama, diantaranya ialah adanya sumber panas atau *heat source*, reservoir, dan batuan penudung atau *caprock*. Adanya magma yang membeku di bawah permukaan bumi merupakan sumber panas dari sistem panasbumi. Pembekuan magma tersebut dapat menghasilkan batuan beku yang menyalurkan panas secara konduktif pada batuan sekitarnya.



Gambar 5. Sistem panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004).

Lapisan paling atas dari sistem panasbumi adalah lapisan penudung (*Cap Rock*), merupakan lapisan *impermeable* yang mampu menjaga panas yang tersimpan di dalam reservoir. Pada lapisan ini biasanya tersusun atas *clay*.

Kemudian reservoir panasbumi sendiri terletak di bawah *Cap Rock*, berfungsi menyimpan panas dan tempat sirkulasi fluida yang mengekstrak panas. Fluida panasbumi yang tersimpan di dalam reservoir terpanaskan oleh sumber panas atau *heat source*. *Heat source* merupakan hasil dari intrusi magma yang memiliki suhu sangat tinggi yaitu >600 °C yang mana letaknya relatif di kedalaman yang dangkal yaitu sekitar 3-5 km (Dickson dan Fanelli, 2004).

3.2 Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan metode elektromagnetik (EM) *sounding* untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan dengan cara melakukan pengukuran pasif komponen medan listrik (E) dan medan magnet (H) alam yang berubah terhadap waktu menggunakan frekuensi gelombang EM dengan spektrum frekuensinya 10-5 Hz -104 Hz. Pada frekuensi yang cukup rendah (kurang dari 1 Hz), angin matahari (*solar wind*) yang mengandung partikel-partikel bermuatan listrik akan berinteraksi dengan medan magnet utama bumi sehingga menyebabkan variasi medan elektromagnetik. Variasi pada frekuensi audio (diatas 1 Hz) disebabkan oleh aktivitas meteorologis berupa petir. Petir yang terjadi di suatu tempat akan menimbulkan gelombang elektromagnetik yang terperangkap antara ionosfer dan bumi yang menjalar mengitari bumi (Grandis, 2010).

Metode magnetotellurik memiliki kemampuan jangkauan penetrasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode geofisika aktif geolistrik. Metode ini mampu mengidentifikasi pola sebaran batuan bahkan lapisan di bawah permukaan dengan mengelompokkan batuan berdasarkan nilai resistivitasnya (Kadir, 2011). Sumber sinyal yang digunakan dalam metode magnetotellurik merupakan medan magnetik yang berasal dari dalam maupun luar bumi serta memiliki *range* frekuensi yang berbeda-beda. Medan magnet yang asalnya dari dalam terbentuk diakibatkan oleh pergerakan antara mantel bumi yang bergesekan dengan inti bumi. Sedangkan medan magnet yang berasal dari luar bumi sendiri dihasilkan di atmosfer dan magnetosfer (Agung, 2009; Kadir, 2011).

Sumber medan magnet yang bersumber dari luar bumi contohnya seperti peristiwa sambaran petir dan munculnya angin matahari yang terjadi. Frekuensi yang diperoleh oleh peristiwa *solar wind* yaitu frekuensi dengan besar lebih kecil dari 1 Hz, oleh karena itu jarak jangkauan medan magnetik cukup dalam (Simpson dan Bahr, 2005). Sedangkan aktivitas petir atau kilat mampu menghasilkan frekuensi di atas 1 Hz (Agung, 2009; Kadir, 2011). Peristiwa terbentuknya sumber dari alam ini terjadi di ionosfer dan menjalar hingga permukaan bumi. Ketika mencapai permukaan bumi, maka terjadi perubahan pada medan magnet bumi. Jika perubahan pada medan magnet bumi terjadi hingga berkali-kali maka hal tersebut akan menghasilkan fluks magnet yang mengalirkan arus listrik di bawah permukaan bumi dan menghasilkan medan magnet sekunder yang selanjutnya akan direkam oleh *receiver* MT (Kadir, 2011).

Perbandingan antara medan magnet dengan medan listrik yang saling tegak lurus ialah impedansi yang juga didefinisikan sebagai sifat kelistrikan suatu medium seperti resistivitas dan konduktivitas. Kurva tiap titik *sounding* yang dihasilkan merupakan kurva *apparent resistivity* terhadap frekuensi untuk menggambarkan variasi konduktivitas listrik terhadap kedalaman. Maka dari itu, secara umum metode MT mampu digunakan untuk memperoleh informasi mengenai struktur tahanan jenis bawah permukaan (Simpson dan Bahr, 2005).

Medan elektromagnetik primer (elektromagnetik alami) yang merupakan sumber metode magnetotellurik mencapai permukaan bumi dengan variasi terhadap waktu. Medan elektromagnetik inilah yang nantinya akan menginduksi *ore body* di bawah permukaan bumi sehingga arus telluric dapat menghasilkan medan elektromagnetik sekunder. *Receiver* (RX) yang berada di permukaan pada stasiun pengukuran berfungsi menangkap total medan elektromagnetik yang merupakan penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Chave dan Jones, 2012).

3.3 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen mengenai fenomena listrik magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulumb disamping dilakukan oleh Maxwell sendiri (Grandis, 2010). Dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat ditulis sebagai berikut:

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

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial B}{\partial \tau} \quad (2)$$

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

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

Keterangan :

E = Medan Listrik (Volt/m)

B = Fluks atau Induksi Magnetic(Weber/m² Atau Tesla)

H = Medan Magnet (Ampere/m)

J = Rapat Arus (Ampere/m²)

D = Perpindahan Listrik (Coulumb/m²)

Hukum Faraday pada persamaan satu (1) menerangkan bahwa terdapat perubahan medan magnetik terhadap waktu dapat menyebabkan terbentuknya medan listrik. Hukum Ampere dipersamaan dua (2) menerangkan yakni medan magnet bukan hanya terjadi akibat adanya sumber arus listrik, tetapi dapat terjadi juga akibat pengaruh perubahan medan listrik terhadap waktu sehingga menginduksi medan magnet. Hukum Coloumb Persamaan tiga (3) menjelaskan bahwa medan listrik disebabkan oleh adanya muatan listrik yang berperan sebagai sumbernya, sedangkan Hukum Kontunuitas Fluks Magnet pada persaman empat (4) menyatakan bahwa tidak terdapat medan magnet yang bersifat monopol (Telford dkk., 1990).

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$D = \varepsilon E \quad (6)$$

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \quad (7)$$

Keterangan :

μ = Permeabilitas Magnetik (henry/m)

ε = Pemisivitas Listrik (Farad/m)

σ = Konduktivitas (ohm-1/m)

ρ = Tahanan Jenis (Ohm.m)

Persamaan Maxwell yang digunakan pada metode magnetotellurik menerapkan asumsi bahwa gelombang elektromagnetik yang menjalar merupakan gelombang bidang. Bumi tidak membangkitkan gelombang elektromagnetik tetapi hanya menyerap atau menghamburkan sebagian gelombang elektromagnetik. Tidak ada akumulasi muatan bebas di dalam bumi berlapis dan bumi bersifat konduktif (Simpson dan Bahr, 2005). Pada studi MT dimana ε adalah permisivitas listrik dan μ permeabilitas magnetic dapat diabaikan apabila dibandingkan dengan variasi konduktivitas batuan atau material (σ), ρ adalah tahanan jenis. Besar permitivitas listrik dan permeabilitas magnetic pada ruang hampa adalah $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ dan $\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$.

3.4 Tensor Impedansi

Definisi dari impedansi adalah perbandingan dari medan listrik dengan medan magnetik. Pada metode magnetotellurik (MT) terdapat salah satu variable yang dicari ialah tensor impedansi $Z(\omega)$. Secara umum, hubungan linier antara medan listrik, medan magnetik, dan impedansi dapat dirumuskan dalam persamaan berikut (Jupp and Vozoff, 1977):

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (8)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (9)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

yang mana $[Z]$ merupakan tensor impedansi.

$H_x(\omega)$, $H_y(\omega)$, $E_x(\omega)$, dan $E_y(\omega)$ merupakan transformasi fourier dari perubahan medan magnetic (H) dan medan listrik (E). Apabila diasumsikan bumi 1-D maka nilai impedansi ditunjukkan oleh persamaan berikut (Jupp and Vozoff, 1977):

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i) \left(\frac{\omega\mu}{2\sigma} \right)^{1/2} \quad (11)$$

yang mana,

E_x = medan listrik pada arah x

H_y = medan magnet pada arah y

Ω = frekuensi angular

μ = permeabilitas magnetik

k = bilangan gelombang

Resistivitas semu, ρ_a , untuk lapisan bumi dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (12)$$

Apabila diasumsikan bumi homogen maka nilai resistivitas semu harus sama pada setiap besar frekuensi dan medan listrik akan berada di atas medan magnetik dengan fase 45° untuk semua frekuensi. Selanjutnya besar tahanan jenis semu dan fase tersebut diplot pada grafik tahanan jenis semu terhadap frekuensi dan fase terhadap frekuensi. Terdapat 2 modus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan bumi 2 dimensi dalam sistem koordinat kartesian dengan y searah dengan *strike* dan x tegak lurus terhadap arah *strike*. modus *Transverse Electric* (TE) merupakan modus yang medan listriknya berarah selurus dengan *strike*, adapun modus *Transverse Magnetik* (TM) adalah memiliki modus yang searah dengan *strike*. Adapun bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan bumi 2 dimensi adalah nol (Simpson dan Bahr, 2005).

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Z_{yx} = ZTE = \frac{E_y}{H_x} \quad (14)$$

$$Z_{xy} = ZTM = \frac{E_x}{H_y} \quad (15)$$

Analogikan bahwa data yang diperoleh dengan menggunakan sistem koordinat (x',y') dan sistem koordinat struktural (x,y) yang mana y searah dengan *strike*, data magnetotellurik dirotasi dari arah (x',y') ke arah (x,y) . Apabila sudut rotasi dari (x',y') ke (x,y) adalah maka kita dapat menerapkan matriks rotasi (Simpson dan Bahr, 2005):

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (16)$$

sehingga,

$$E = RE' \text{ dan } H = RH' \quad (17)$$

Sudut rotasi (θ) di atas dapat ditentukan dengan melakukan rotasi tensor impedansi secara meningkat atau dapat dihitung secara analitik berdasarkan persamaan berikut:

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{2R_1R_2 + I_1I_2}{R_1^2 + I_1^2 - R_2^2 - I_2^2} \right) \quad (18)$$

$$\begin{cases} R_1 = \text{Re}(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ I_1 = \text{Im}(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ R_2 = \text{Re}(Z_{xy} - Z_{yx}) \\ I_2 = \text{Im}(Z_{xy} - Z_{yx}) \end{cases} \quad (19)$$

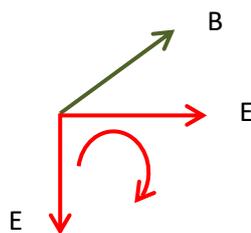
Tensor impedansi (Z) didefinisikan sebagai bilangan kompleks yang terdiri atas bagian imajiner dan riil. Sehingga, masing – masing dari komponen, Z_{ij} dan Z tidak hanya memiliki besar, tapi juga memiliki fase sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (Fiona dan Karsten, 2005):

$$\rho_{a,i,j}(\omega) = \frac{1}{\pi_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (20)$$

$$\varphi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{ij}\}}{\text{Re}\{Z_{ij}\}} \right) \quad (21)$$

3.5 *Tranverse Magnetic*

Mode *Tranverse Magnetic* (TM) menunjukkan bahwa pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen medan listrik saja sedangkan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2007).

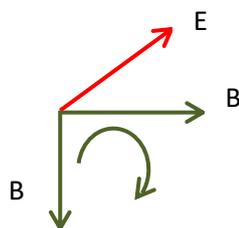


Gambar 6. TM mode (Unsworth, 2007).

Dalam TM mode ini, terjadi fenomena efek konduktif yang terjadi juga pada TE mode, namun pada mode ini terjadi juga efek lain yaitu efek statik yang disebabkan adanya heterogenitas resistivitas medium, sehingga muatan-muatan terkumpul pada batas medium tersebut (Unsworth, 2007).

3.6 *Tranverse Electric*

Mode *Tranverse Electric* (TE) menunjukkan bahwa pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen magnetiknya saja sedangkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2007).



Gambar 7. TE mode (Unsworth, 2007).

Dalam mode TE, arus listrik tidak akan mengalir melewati batas antara daerah yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, oleh karena itu komponen E_x akan kontinu terhadap bidang sumbu y , demikian juga dengan yang akan kontinu terhadap bidang sumbu y . Karena itulah TE mode sangat baik jika masih menggunakan analisa 1-dimensi (Unsworth, 2007).

3.7 *Skin Depth*

Medan elektromagnetik memiliki sifat ialah apabila medan elektromagnetik melewati lapisan konduktif menyebabkan energi dari medan elektromagnetik tersebut akan teratenuasi. Jarak tembus yang mampu dilalui oleh medan elektromagnetik akan berkurang seiring seberapa besar nilai konduktivitas

dari lapisan konduktif saat menembus lapisan tersebut, jarak maksimum yang dapat dicapai oleh medan elektromagnetik saat menembus lapisan konduktif inilah yang dinamakan *skin depth*. Nilai *skin depth* dipengaruhi oleh besar nilai resistivitas bahan dan frekuensi yang digunakan (Grandis, 2010).

Metode magnetotellurik melihat dari seberapa jauh penetrasi yang masuk kedalam bumi (Green, 2003). Gelombang elektromagnetik dan konduktivitas batuan bumi inilah yang akan berpengaruh terhadap kedalaman penetrasi. Metode magnetotellurik memiliki kemampuan penetrasi yang sangat dalam yakni mencapai lebih dari kedalaman 3 km. Semakin kecil besar nilai frekuensi yang ditangkap oleh alat, maka akan semakin dalam capaian penetrasi alat yang diperoleh. Namun proses perekaman data menjadi semakin lama (Simpson dan Bahr, 2005). Besaran *skin depth* digunakan dalam memperkirakan capaian penetrasi atau kemampuan serapan investigasi gelombang elektromagnetik. Berikut persamaan *skin depth* dalam metode magnetotellurik seperti di bawah ini:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} \cong 0.503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (km) \quad (22)$$

Pada persamaan (33) dapat dilihat bahwa *skin depth* dipengaruhi oleh seberapa besar frekuensi alat yang digunakan dan resistivitas batuan. Semakin besar frekuensi alat yang digunakan, diperoleh penetrasi yang dihasilkan akan semakin dangkal. Akan tetapi, apabila frekuensi alat semakin kecil, maka capaian frekuensi yang dihasilkan akan semakin dalam. Sementara dengan besar frekuensi alat yang sama, namun nilai tahanan jenis formasi batuan yang terdapat di bawah lapisan bumi akan menghasilkan penetrasi yang semakin dalam. Sedangkan apabila lapisan di bawah permukaan memiliki tahanan jenis formasi yang lebih kecil, maka capaian penetrasi yang diperoleh juga semakin dangkal.

Besar kecilnya penetrasi bergantung pada nilai tahanan jenis batuan, hal ini disebabkan lapisan yang memiliki nilai tahanan jenis yang lebih rendah akan lebih mampu mengalir dibandingkan dengan lapisan yang lebih resistif. Ketika lapisan konduktif menerima injeksi arus dari luar, arus eksternal akan

lebih cenderung mengalir hanya pada lapisan konduktif, tidak mengalir ke lapisan di bawahnya yang lebih resistif. Maka dari itu, faktor resistansi spesifik formasi batuan dapat memberikan pengaruh terhadap kedalaman penetrasi yang diperoleh. Parameter yang diukur dalam survei magnetotellurik adalah medan listrik dan medan magnet di daerah tersebut (Daud, 2010). Dalam teori elektromagnetik, medan listrik akan selalu tegak lurus dengan medan magnet. Impedansi adalah perbandingan dari medan magnet dan medan listrik. Impedansi ini mengandung informasi mengenai nilai tahanan jenis medium terhadap kedalaman.

3.8 Pengolahan Data Magnetotellurik

Pengolahan data magnetotellurik melibatkan konsep dari teori elektromagnetik, analisis *time series*, dan teori sistem linear untuk mengurangi variasi alami dari medan listrik dan medan magnet yang direkam dari permukaan bumi sehingga dapat dijadikan bahan untuk mempelajari sifat lapisan dalam bumi (Hermance, 1973). Data magnetotellurik yang diperoleh dari akuisisi di lapangan tidak lepas dari gangguan *noise* sehingga perlu dilakukan pengolahan data (Simpson & Bahr, 2005). Adapun tahapan dalam pengolahan data magnetotellurik adalah sebagai berikut:

3.8.1 Transformasi Fourier

Langkah pertama yang dilakukan dalam pengolahan data untuk mengurangi *noise* ialah mengubah domain data dalam bentuk waktu menjadi domain frekuensi. Hal ini dilakukan dengan cara transformasi fourier. Pada prinsipnya, transformasi fourier ini merupakan suatu operasi matematis yang bertujuan mengubah sinyal menjadi spektrum (Heditama dan Dzil, 2011). Proses transformasi ke dalam domain frekuensi ini dilakukan karena parameter fisis seperti impedansi, resistivitas semu, dan fase merupakan fungsi frekuensi (Dewi, 2012).



Gambar 8. Prinsip transformasi fourier (Hediatama dan Dzil, 2011).

Transformasi fourier merupakan fungsi yang mampu mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Transformasi ini dapat dirumuskan sebagai berikut (Simpson dan Bahr, 2005):

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt \quad (23)$$

Pada persamaan di atas, fungsi gelombang dalam domain frekuensi disimbolkan dengan (ω) , sedangkan fungsi gelombang dalam domain waktu disimbolkan dengan (t) .

3.8.2 *Robust Processing*

Robust processing adalah teknik pemrosesan statistikal yang menggunakan bobot iteratif dari residual dalam menelaah dan menghapus data yang menyimpang oleh *noise*. *Robust processing* menggunakan beberapa pengukuran dari suatu kontribusi individual untuk merendahkan bobot *outliers* pada iterasi selanjutnya. *Outlier* sendiri adalah data dengan nilai yang terlewat jauh dari nilai rata-rata, umumnya, sehingga data tersebut dapat dianggap sebagai *noise* dan proses *robust processing* ini yang berperan sebagai filter *noise* awal bagi data magnetotelurik.

3.8.3 Seleksi *Crosspower*

Seleksi *crosspower* dilakukan dengan melakukan *editing* data MT yang telah melalui *robust processing*. Seleksi dapat dilakukan secara otomatis maupun manual. Seleksi *cross power* secara manual dapat dilakukan dengan mematikan atau menyalakan data tertentu sehingga didapatkan kombinasi data yang tepat. Proses seleksi *crosspower* membuat tren kurva terlihat lebih masuk akal karena tidak terjadi perubahan yang tiba tiba terutama pada data di frekuensi rendah. Seleksi dilakukan pada tiap data untuk semua frekuensi hingga didapatkan kurva *apparent resistivity* dan *phase* yang baik (Hendryan, 2018).

3.8.4 Transformasi *Bostick*

Pemodelan 1D data MT menggunakan transformasi *Bostick*. Metode transformasi *Bostick* (Jones, 1983) merupakan cara yang cepat dan mudah untuk memperkirakan variasi resistivitas terhadap kedalaman

secara langsung dari kurva *sounding* resistivitas semu. Metode ini diturunkan dari hubungan analitik antara resistivitas frekuensi dan kedalaman investigasi atau *skin depth*. Namun perlu diingat bahwa metode ini bersifat aproksimatif sehingga hanya dapat dilakukan sebagai usaha pemodelan dan interpretasi pada tahap pendahuluan. Transformasi *Bostick* memberikan perkiraan distribusi resistivitas dan kedalaman $\rho_B(h)$ hingga $\rho_N(h)$, dimana h adalah penetrasi kedalaman pada medium *halfspace* dalam resistivitas yang sama untuk resistivitas semu pada periode (T), dijelaskan dengan persamaan:

$$h = \sqrt{\frac{\rho a(T) T}{2\pi\mu_0}} \quad (24)$$

Resistivitas *Bostick* $\rho_B(h)$ terhadap kedalaman, diberikan oleh:

$$\rho_B(h) = \rho a(T) \frac{1+m(T)}{1-m(T)} \quad (25)$$

dimana (T) adalah gradien pada kurva resistivitas semu dalam skala $\log - \log$:

$$m(T) = \frac{d \log(\rho a(T))}{d \log(T)} = \frac{T}{\rho a(T)} \frac{d \rho a(T)}{dT} \quad (26)$$

Pernyataan alternatif untuk resistivitas *Bostick* pada kedalaman (h) digunakan oleh beberapa penulis, diterangkan Weidelt, et al, 1980; Goldberg dan Rotstein, 1982:

$$\rho_B(h) = \rho a(T) \left(\frac{\pi}{2\varphi(T)} - 1 \right) \quad (27)$$

Dengan $\varphi(T)$ merupakan informasi fasa.

3.8.5 Koreksi *Static Shift*

Pada metode magnetotellurik terdapat 2 metode pengukuran yang dapat digunakan dalam suatu proses pemodelan atau tahap pertama interpretasi, yaitu *Transverse Electric Mode*, adapun komponen yang menunjukkan medan listriknya sejajar dengan arah struktur utama dinamakan dengan *Transvers Electric (TE) mode* atau biasa disebut juga sebagai *E-Polarization*. Selanjutnya *Transverse Magnetic Mode*,

untuk komponen yang memperlihatkan medan magnet pada posisi sejajar dengan arah struktur utama disebut sebagai *Transverse Magnetic (TM) mode* atau disebut juga *B-Polarization*. Biasanya kurva TE dan TM selalu berhimpitan. Akan tetapi, terdapat banyak kasus yang mana kurva tersebut tidak berhimpit atau disebut dengan kondisi *shifting*. Hal ini selanjutnya dapat menyebabkan nilai tahanan jenis yang terkandung dalam lapisan batumannya menjadi tidak sesuai. Maka dilakukan koreksi secara manual titik-titik pada kurva TE dan TM yang bertujuan untuk mendekati kurva semestinya, fenomena ini diakibatkan oleh efek topografi dan kondisi heterogenitas permukaan (Simpson dan Bahr, 2005).

3.9 Pemodelan Inversi 2 Dimensi Magnetotellurik

Pengukuran metode magnetotellurik secara umum, biasanya menggunakan lebih dari satu titik pengukuran yang tersebar di area target penelitian. Pada masing-masing stasiun tersebut memiliki tiga buah komponen untuk medan magnetik dan dua komponen untuk medan elektrik, komponen-komponen tersebut difungsikan agar dapat menghitung besar tensor impedansi dan variasi vektor tipper sekaligus dengan *error* yang dihasilkan. Metode *modern robust data processing* digunakan dalam memperhitungkan besar fungsi transfer dan deviasi/penyimpangan dari *data time series* (Grandis, 2013). Pada kasus magnetotellurik 2D tensor impedansinya adalah sebagai berikut:

$$Z = \begin{Bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

Dapat dilihat dari persamaan (39) menghubungkan antara komponen horisontal dari gelombang EM pada bidang permukaan pada satu posisi dan frekuensi tertentu, sedangkan kurva-x menunjukkan arah *strike* (Chave dan Jones, 2012).

$$Eh = \begin{Bmatrix} Ex \\ Ey \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & Z_{te} \\ Z_{tm} & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Hx \\ Hy \end{Bmatrix} = Z2dHh \quad (29)$$

yang mana

$$Z_{xy}(\omega) = Z_{te} = \frac{Ex(\omega)}{Hy(\omega)} \quad (30)$$

$$Z_{yx}(\omega) = Z_{tm} = \frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)} \quad (32)$$

3.10 Geokimia Panasbumi

Pada kajian geokimia, terdapat dua metode geokimia fluida panasbumi yang dapat digunakan diantaranya terdapat geoindikator yang digunakan dalam penentuan tipe fluida, asal, dan kematangan atau lingkungan fluida (mata air panas). Kedua terdapat geotermometer yang dapat digunakan untuk memperkirakan besar suhu (*temperature*) yang dimiliki suatu reservoir. Hasil identifikasi berdasarkan geoindikator dan geotermometer dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dari fluida panas bumi dan juga mampu mengetahui bagaimana sistem panas bumi di area penelitian, serta zona *upflow* maupun zona *outflow* (Ellis dan Mahon, 1977).

3.10.1 Geoindikator

Geoindikator adalah suatu zat terlarut yang sifatnya reaktif serta mencerminkan kondisi lingkungan ekuilibrium (kesetimbangan) menurut (Giggenbach, 1988). Terdapat 3 tipe geoinikator kimia panas bumi, yaitu:

a. Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃

Diagram segitiga trilinier Cl-SO₄-HCO₃ adalah suatu metode yang digunakan untuk menentukan tipe dari fluida reservoir panas bumi dengan tujuan agar dapat mengetahui karakteristik suatu reservoir. Diketahui kandungan relatif yang digunakan sebagai parameter penilaian adalah kandungan ion klorida (Cl), ion sulfat (SO₄), dan ion bikarbonat (HCO₃).

a. Geoindikator Cl-Li-B

Diagram segitiga trilinier Cl-Li-B merupakan diagram yang digunakan untuk menggambarkan tentang proses mendidihnya dan mengencernya fluida panas berdasarkan perbandingan antara konsentrasi Cl/100 dan B/4 yang telah diubah dalam satuan persen.

b. Geoindikator Na-K-Mg

Menurut Giggenbach (1988), diagram segitiga Na-K-Mg merupakan metode yang digunakan dengan tujuan memperkirakan suhu reservoir

panasbumi dan untuk mengidentifikasi air yang telah mencapai keseimbangan dalam litologi.

3.10.2 Geotermometer Air

Geotermometer digunakan dalam memperkirakan suhu di bawah permukaan atau reservoir panasbumi berdasarkan pada letak keberadaan zat-zat terlarut pada fluida panasbumi, yang mana konsentrasi pada fluida tersebut sangat bergantung pada temperatur (Ariowo dan Nurohman, 2012). Adapun jenis-jenis geotermometer yang digunakan sebagai parameter dalam penentuan *temperature* reservoir diantaranya:

- a. Geotermometer Silika, merupakan geotermometer yang penerapannya berdasarkan pada kelarutan kandungan silika dalam air sebagai fungsi dari suhu (*temperature*) (Fournier, 1977).
- b. Geotermometer Na-K, yaitu respon rasio konsentrasi Na terhadap K yang persentasenya saling tegak lurus terhadap temperatur fluida dan didasarkan pada reaksi pertukaran kation yang bergantung pada temperatur (Fournier, 1979; Giggenbach, 1988).

3.11 Fluida Panasbumi

Menurut Nicholson (1993), tipe panas berdasarkan kandungan anion dominan dibagi menjadi Cl, SO₄, HCO₃ sebagai berikut:

3.11.1 *Chloride Water* (Air Klorida)

Air klorida merupakan tipe fluida panasbumi yang biasa ditemukan di kebanyakan area dengan sistem *high temperature*. Area dengan mata air panas yang mengalir dengan skala besar dan mengandung konsentrasi klorida yang tinggi merupakan fluida yang berasal dari reservoir dalam, dan menjadi indikasi adanya zona *permeable* pada area tersebut.

3.11.2 *Sulfate Water* (Air Sulfat)

Air sulfat merupakan fluida panasbumi yang proses terbentuknya disebabkan oleh kondensasi gas panasbumi pada air permukaan.

Hidrogen Sulfida (H_2S) yang terdapat dalam uap panas selanjutnya mengalami proses oksidasi dan menghasilkan sulfat.

3.11.3 *Bicarbonate Water* (Air Bikarbonat)

Fluida ini merupakan hasil dari proses kondensasi gas dan uap menjadi mata air bawah tanah yang minim kandungan oksigen. Air bikarbonat biasanya dikenali juga sebagai *netral bicarbonate–sulphate waters*. Fluida ini banyak dijumpai pada daerah yang tidak berhubungan dengan sistem vulkanik namun mengandung temperatur yang tinggi. Tipe air ini kebanyakan mengandung pH cenderung netral akibat adanya reaksi dengan batuan selama masa migrasi lateralnya.

3.11.4 *Chloride Sulfate Water* (Air Sulfat Klorida)

Air ini merupakan tipe fluida panas bumi yang terbentuk akibat pencampuran air klorida dan air sulfat dimana Hidrogen Sulfida (H_2S) dalam air alkali klorida teroksidasi menjadi ion sulfat (SO_4^{2-}).

3.11.5 Air Dilute Klorida Bikarbonat

Terbentuknya air ini disebabkan oleh adanya interaksi dari air klorida dengan air bikarbonat selama perjalanan dari reservoir ke permukaan. Diduga air ini berada di antara batas zona *upflow* dengan struktur *outflow* pada sistem panasbumi dengan temperatur tinggi.

3.12 Resistivitas Batuan

Resistivitas batuan merupakan sifat yang dimiliki batuan yang dapat menghambat aliran listrik, sifat ini dipengaruhi oleh mineral, porositas batuan, dan kadar air yang dikandung oleh batuan. Adapun aliran listrik yang terjadi pada batuan terbagi menjadi 3, yaitu konduksi secara elektrolitik, konduksi secara elektronik, dan konduksi secara dielektrik. Terjadinya proses konduksi karena batuan atau mineral memiliki elektron bebas yang banyak sehingga arus listrik di dialirkan oleh elektron tersebut ke dalam batuan (Telford dkk, 1990)

Tabel 1. Nilai resistivitas material bumi (Telford dkk, 1990)

Material	Resistivitas (Ωm)
Udara	~

<i>Sea Water</i> (Air asin)	0.2
<i>Ground Water</i> (Air tanah)	0.5 – 300
<i>Clay</i> (Lempung)	1 – 100
<i>Sand</i> (pasir)	1 – 1.000
<i>Sandstone</i> (Batu pasir)	200 – 8.000
<i>Alluvium</i>	10 – 800
<i>Gravel</i> (kerikil)	100 – 600
<i>Andesite</i>	$1.7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
<i>Basalt</i>	200 – 100.000
<i>Limestone</i> (gamping)	500 – 10.000
<i>Quartz</i> (Kwarsa)	500 – 800.000
<i>Dry Gravel</i> (kerikil kering)	600 – 10.000
<i>Pyrite</i>	0.001 – 100
<i>Calcite</i>	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
<i>Rock Slat</i>	$30 - 1 \times 10^{13}$
<i>Magnetite</i>	0.01– 1.000

Salah satu sifat batuan adalah resistivitas (tahanan jenis) yang menunjukkan kemampuan bahan tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya (Grandis, 2013).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun pada penelitian ini dilakukan pada:

Tempat: Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika,
Universitas Lampung

Alamat: Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145,
Indonesia.

Waktu: Maret – Juni 2023

4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop

Proses pengolahan dan pemodelan data magnetotellurik harus menggunakan perangkat atau *device* yang mendukung. Laptop dengan kualifikasi yang baik dapat mempermudah proses pengolahan dan pemodelan data.

2. *Software* SSMT 2000

Software SSMT2000 merupakan *software* yang digunakan untuk mengubah data yang masih dalam bentuk fungsi waktu menjadi domain frekuensi. Adapun data yang diinput diantaranya ialah *data time series*, data kalibrasi alat (.CAL), dan parameter pengukuran.

3. *Software* MT Editor

MT Editor digunakan untuk menganalisa kurva resistivitas dan kurva fase. Dilakukan pengeditan *noise* baik secara otomatis maupun manual

menggunakan *software* ini dengan melakukan *picking* terhadap *crosspower* data frekuensinya. Adapun *output* yang didapatkan berupa data *.edi.

4. *Software* WinGLink

Data yang telah dihilangkan *noisenya*, selanjutnya dapat dilakukan pemodelan. Dengan menggunakan *software* WinGLink, maka dapat dimunculkan pemodelan *sounding*, *pseudosection*, *x-section*, 1D, 2D, model sumur, bahkan 3D.

5. *Software* ArcGIS 10.8

Untuk mengetahui lokasi penelitian dan juga kondisi geologi regionalnya, maka diperlukan peta yang menggambarkan hal-hal tersebut. ArcGIS merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

6. Data Magnetotellurik daerah penelitian

Data ini masih berbentuk *Data Time Series* dengan *noise* yang didapatkan saat pengukuran di lapangan.

7. Data Geokimia daerah penelitian

Data geokimia digunakan untuk mengetahui karakteristik sistem panasbumi daerah penelitian.

4.3 Jadwal Kegiatan Penelitian

Jadwal kegiatan pada penelitian ini diuraikan pada **Tabel 2.** berikut:

Tabel 2. Jadwal kegiatan tugas akhir

No	Kegiatan	Maret			April				Mei				Juni				Juli				
		2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1.	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.	Persiapan Penelitian	■	■	■																	
3.	Seminar Usul				■																
4.	Pengolahan Data: 1. Transformasi Fourier 2. <i>Robust Processing</i> 3. Seleksi <i>Crosspower</i>				■	■	■	■													
5.	Pemodelan 2-D								■	■											
6.	Interpretasi										■	■									
7.	Identifikasi Geokimia								■	■	■	■									
7.	Penyusunan Laporan											■	■	■	■						
8.	Seminar Hasil															■					
9.	Penyelesaian Skripsi dan Pengajuan Sidang																■	■	■	■	
10.	Sidang Akhir Skripsi																				■

4.4 Prosedur Penelitian

4.4.1 Persiapan Penelitian

Pada tahap ini merupakan tahap awal penelitian yaitu melakukan pemahaman materi lebih lanjut setelah dilakukan studi literatur. Selain itu, dilakukan pengumpulan data yang akan dilakukan pada penelitian ini diantaranya data magnetotellurik dan data geokimia yang diperoleh dari akuisisi oleh tim eksplorasi PSDMBP pada 2016.

4.4.2 Pengolahan Data Magnetotellurik

Data magnetotellurik yang diperoleh dari akuisisi di lapangan tidak lepas dari gangguan *noise* sehingga perlu dilakukan pengolahan data (Simpson & Bahr, 2005). Pada tahap pengolahan data magnetotellurik ini dilakukan proses perubahan data primer yang diperoleh dari akuisisi lapangan berupa *data time series* ke dalam domain frekuensi serta

serangkaian proses koreksi *noise* sebelum dilakukan pemodelan. Adapun tahapan yang dilakukan pada saat pengolahan data magnetotellurik adalah sebagai berikut.

1. Transformasi Fourier

Pada tahap ini dilakukan konversi data. Pada dasarnya data yang diperoleh pada saat akuisisi di lapangan adalah data primer yang berbentuk domain waktu, data yang masih dalam bentuk *time series* tidak bisa digunakan untuk menghilangkan *noise*. Oleh karena itu, dilakukan proses Transformasi Fourier yang bertujuan untuk mengubah data *time series* menjadi data dalam domain frekuensi. Proses ini dilakukan dengan menggunakan *software* SSMT 2000.

2. *Robust Processing*

Setelah data *time series* dikonversi menjadi domain frekuensi, selanjutnya dilakukan pengaturan parameter data yang akan digunakan atau *Robust Processing* (menggunakan SSMT 2000). Adapun komponen parameter yang perlu diatur diantaranya rentang frekuensi yang akan digunakan, *crosspower* parameter, tipe referensi (data *local* atau data *remote*), *robust parameter* yang terdiri dari pengaturan koherensi dan variasi nilai resistivitas.

3. Seleksi *Crosspower*

Pada tahap ini mulai dilakukan proses koreksi untuk mengurangi *noise* pada data menggunakan *software* MT Editor. Data magnetotellurik yang akan dikoreksi berupa resistivitas semua dan *phase* yang ditunjukkan dalam bentuk kurva. Kurva yang berbentuk cenderung *continue* diindikasikan sebagai data yang baik, untuk mendapatkan bentuk kurva yang baik maka perlu dilakukan *editing* untuk menghilangkan *noise*. Pada tahap inilah data yang dikoreksi dapat dihidupkan atau dimatikan agar mendapatkan bentuk kurva yang diinginkan dan nilai *error* yang semakin kecil.

4.4.3 Pemodelan Inversi 1D dan 2D Data Magnetotellurik

Data yang telah melalui proses koreksi *noise* selanjutnya dapat digunakan untuk memodelkan bentuk bawah permukaan di daerah

penelitian. Penelitian ini merupakan lanjutan dari kegiatan Kerja Praktik yang melakukan pemodelan data magnetotellurik sampai 1 dimensi untuk menunjukkan nilai resistivitas pada setiap titik *sounding*, sehingga pada penelitian ini dilakukan pemodelan 2 dimensi agar dapat menunjukkan model bawah permukaan pada tiap lintasan serta mendapatkan gambaran sistem panasbuminya. Adapun *software* yang digunakan ialah WinGLink.

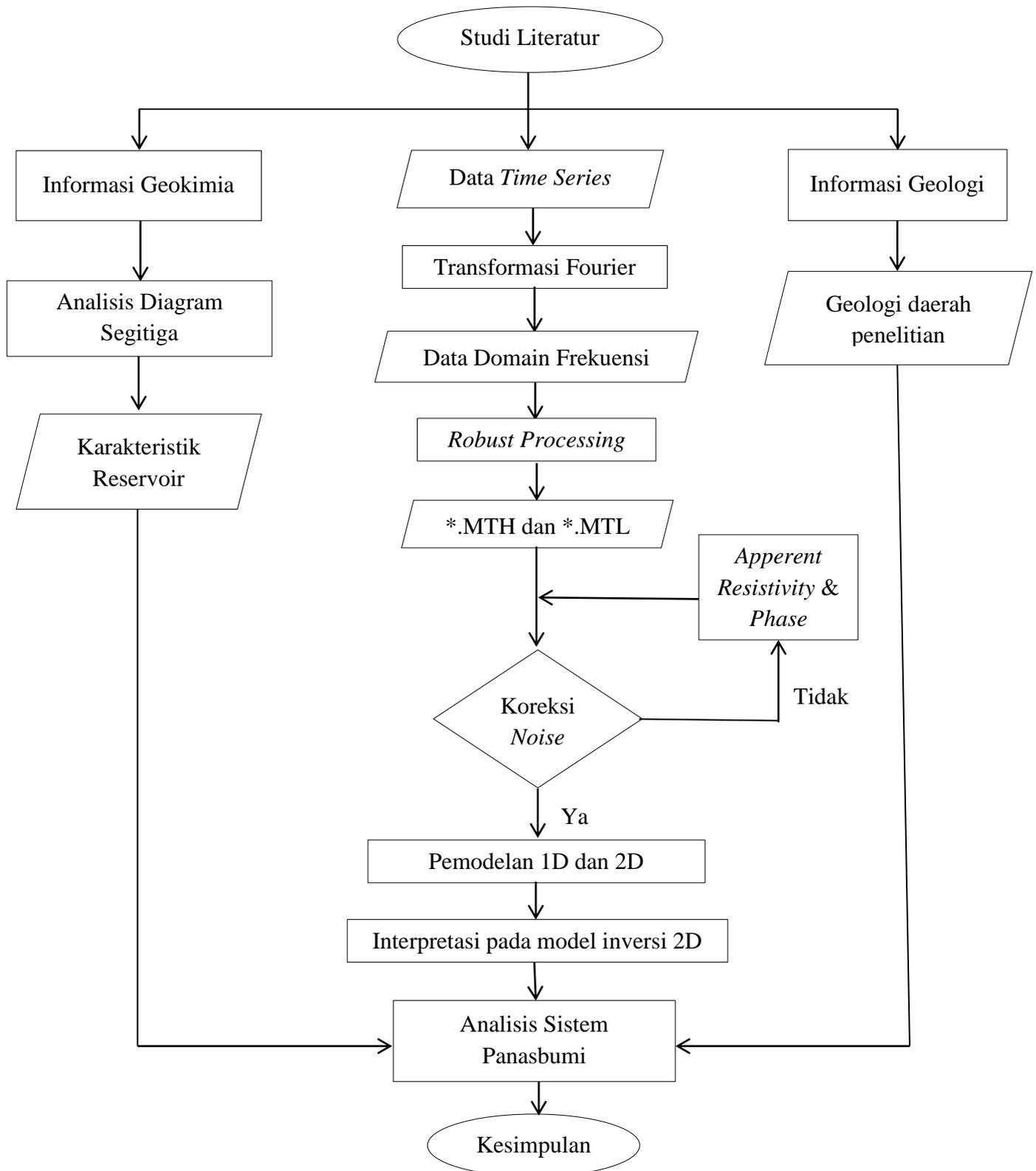
Untuk melakukan pemodelan inversi 2 dimensi menggunakan WinGLink, diperlukan data dalam format *.Edi file yang diperoleh pada tahap pengolahan data. Adapun hal pertama yang perlu dilakukan adalah membuat peta lintasan untuk melihat bentuk kurva *Apperent Resistivity* dan *Phase* pada tiap titik pengukuran. Apabila terdapat data yang bentuk kurvanya masih kurang baik, dapat dilakukan koreksi *static shift* dengan metode *Masking*. Selanjutnya dapat dilakukan pemodelan inversi 2 dimensi pada tiap lintasan hingga memunculkan bentuk penampang yang diinginkan.

4.4.4 Kajian Data Geokimia

Data geokimia dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik fluida panasbumi sehingga dapat memperkirakan temperatur bawah permukaan. Data geokimia yang digunakan didapatkan setelah mengambil sample dari manifestasi yang berada di daerah penelitian. Giggenbach (1988) menyebutkan bahwa terdapat tiga jenis diagram segitiga yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi karakteristik fluida panasbumi. Diagram segitiga tersebut diantaranya diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ digunakan untuk mengetahui tipe air panas, diagram segitiga Cl-Li-B digunakan dalam penentuan asal fluida panas bumi dan menentukan zona *upflow* dan zona *outflow* dari sebuah sistem panas bumi, serta diagram segitiga dari Na-K-Mg yang digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir dan untuk mengetahui air yang mencapai kesetimbangan dalam litologi.

4.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini seperti pada **Gambar 8.** berikut:



Gambar 9. Diagram alir.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengolahan data magnetotellurik pada kedua lintasan pengukuran dilakukan dengan transformasi fourier, *robust processing*, dan seleksi *cross power*. Selanjutnya dilakukan koreksi *static shift* saat pemodelan baik 1D maupun 2D. Model 1D menunjukkan nilai resistivitas pada tiap titik *sounding* sedangkan model 2D mampu menunjukkan sebaran resistivitas dari satu lintasan pengukuran dengan lebih jelas.
2. Hasil interpretasi pada model inversi 2 dimensi data magnetotellurik menunjukkan persebaran nilai resistivitas terbagi menjadi 3 yaitu resistivitas rendah dan resistivitas sedang. Resistivitas rendah memiliki rentang 1-38 Ωm dengan warna merah hingga kuning diduga sebagai lapisan *caprock*. Resistivitas sedang dengan rentang 38-283 Ωm yang ditunjukkan oleh warna hijau diduga sebagai lapisan reservoir. Dan resistivitas tinggi dengan besar $>283 \Omega\text{m}$ diduga sebagai *heatsource*.
3. Hasil analisis geokimia menunjukkan karakteristik fluida panasbumi daerah penelitian merupakan tipe fluida dengan kandungan klorida atau sulfat. Fluida panasbumi berasal dari reservoir dan dalam kondisi *partial equilibrium* atau *immature waters*.
4. Diperoleh sistem panasbumi daerah penelitian terdiri atas lapisan *caprock* yang tersusun atas batuan ubahan dominasi lempung, lapisan reservoir tersusun atas batupasir karbonat, lapisan yang tersusun oleh batuan vulkanik panas sebagai sumber panas, serta terdapat struktur geologi berupa sesar Poco Dedeng berarah Baratlaut-Tenggara. Zona

upflow berada di kaldera Sanonggoang sedangkan zona *outflow* berada di lokasi yang terdapat mata air panas. Sehingga didapatkan bahwa daerah penelitian memiliki sistem panasbumi yang baik.

6.2 Saran

Saran pada penelitian ini adalah agar dilakukan penelitian lanjutan menggunakan metode geofisika lainnya seperti metode gayaberat dan geomagnetik untuk mendukung serta memvalidasi kondisi sistem panasbumi di daerah Waesano.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, L. 2009. Pemodelan Sistem Geothermal dengan Menggunakan Metode Magnetotelurik di Daerah Tawau, Sabah, Malaysia. *Skripsi*. Universitas Indonesia
- Bemmelen Van, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Martinus Nyhoff, Netherland: The Haque.
- Daud, Y. 2010. *Metode Mangnetotelurik Laboratorium Geofisika*. Depok: Universitas Indonesia.
- Dickson, M. H., dan Fanelli M. 2004. *What is Geothermal Energy*. Italy: Instituto di Geoscienze e Georisorse-CNR.
- Ditjen EBTKE dan Badan Geologi. 2017. *Potensi Panasbumi Indonesia Jilid 2*. Jakarta: Direktorat Panas Bumi Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Ellis, A.J., and Mahon, W. A. J. 1977. Chemical Geothermometry in Geothermal Systems. *Geothermics*, 219-226 pp
- Fiona, S., Karsten, B., 2005. *Practical Magnetotellurics*. NewYork: Cambridge UniversityPress.
- Fournier, R. O. 1979., *A Revised Equation for The Na/K Geothermometer*. California: U.S Geological Survey.
- Fournier, R. O dan Rowe, J. J., 1977. Estimation of Underground Temperatures from the Silica Content of Water From Hot Springs and Wet-Steam Wells. *American Journal of Science*, Vol. 264.

- Gaffar, E.Z., Dadan, D.W. dan Djedi, S.W. 2007. Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan G. Ungaran Jawa Tengah, dan Implikasinya Terhadap Struktur Panasbumi. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika: Vol. 8, No.2*, 98-118.
- Giggenbach, W.F. 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of NaK-Mg-Ca Indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 52 No.12*, pp. 2749-2765.
- Grandis, H. 2010. *Study Efek Statik Pada Data Magnetotellurik dengan Menggunakan Pemodelan 2D*. ITB: Bandung.
- Grandis, H. 2013. *Metode Magnetotellurik (MT)*. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Green, A.M. 2003. *Magnetotelluric Crustal Studies in Kenai, Alaska*. Colorado: School of Mines.
- Gupta, H. dan Ray, S. 2007. *An Outline of the Geology of Indonesia*. Jakarta: IAGA. hal 11-36.
- Jupp, D.L., Vozoff, K. 1977. Two-dimensional magnetotelluric inversion. *Geophysical Journal International 50*, 333–352.
- Kadir, T.V.S. 2011. *Metode Magnetotellurik (MT) Untuk Eksplorasi Panas Bumi Daerah Lili, Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi, Universitas Indonesia*. Kekhususan Geofisika Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam: Depok. (Skripsi).
- Koesoemadinata, s., Noya, Y., dan Kadarisman, D. 1994. *Peta Geologi Bersistem, Indonesia*. Lembar: Ruteng, 2107. (1:250.000).
- Kusnadi, D., Hadi, M. N. dan Simarmata, R. 2015. *SURVEI GEOLOGI DAN GEOKIMIA PANAS BUMI DAERAH WAESANO, KABUPATEN MANGGARAI BARAT, PROVINSI NUSA TENGGARA TIMUR*. Kelompok Penyelidikan Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Geologi (tidak dipublikasikan).
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids, Chemistry & Exploration Techniques*. Berlin: Springer.

- Ratman, N., Yasin, A. 1978. *Peta Geologi Bersistem, Nusa Tenggara*. Lembar: Komodo 2007. (1:250.000).
- Simpson, F., dan Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Suparno, S. 2009. *Energi Panasbumi: A present from the hearth of the earth*. Depok: Universitas Indonesia.
- Telford, W. M., dkk. 1990. *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Unsworth. 2006. *Overview of Elektromagnetic Exploration Methods*. Canada: University of Alberta.
- Wannamaker, P. E., Stodt, J. A. dan Rijo, L. 1985. A Stable Finite Element Solution for Two Dimensional Magnetotellurik Modeling. *Geophysical Journal International: Royal Astronomical Society*. Vol 88, 277-296.
- Widiatmoko, F. R., dkk. 2020. The conceptual model of Wae Sano Geothermal field based on Geology and Geochemistry data. *Journal of Earth and Marine Technology*, Vol 1 (1), 56-63.