

**ANALISIS KARAKTERISTIK SISTEM PANAS BUMI “TP”
BERDASARKAN DATA GEOKIMIA MANIFESTASI
PERMUKAAN, DATA MAGNETOTELLURIK DAN
TINJAUAN GEOLOGI ZONA BANDUNG**

(Skripsi)

Oleh
DETRI VIKI MANDASARI
1615051001



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRACT

ANALYSIS THE CHARACTERISTICS OF GEOTHERMAL SYSTEM "TP" BASED ON GEOCHEMICAL DATA OF SURFACE MANIFESTATION, MAGNETOTELLURIC DATA AND GEOLOGICAL REVIEW OF THE BANDUNG ZONE

By

DETRI VIKI MANDASARI

Geothermal systems in Indonesia have massive potential, for early identification research needs to be done with several research investigations using 3G Concepts, Geology, Geophysics and Geochemistry. Geochemical and magnetotelluric data analysis was carried out to identify fluid types, reservoir temperature estimates, and geothermal systems in the study area. In this study, analysis was conducted on 9 points of Tangkuban Perahu volcano manifestation area, namely the manifestation of Batugede, Batukapur, Ciracas, Ciater, Maribaya, Domas, and Kancah. There are 16 hot spring samples and 3 magnetotelluric measurement paths that will be used to find out information and model descriptions of geothermal systems in this research area. This study is intended to determine information related to geothermal fluids and the existence of the constituent components of geothermal systems. The results of the analysis of fluid geochemical data show that the fluid samples used are dominated by bicarbonate fluid (HCO_3) which is in the outflow zone with good equilibrium and has an estimated reservoir temperature ranging from 140oC - 185oC. The results of the magnetotelluric 3D visualization model show the existing layers in this study area, namely there is a claycap layer at an elevation of 500 to - 2000 masl which is characterized by a resistivity value of 1.2 - 10 Ohm.m which thickens towards the north and thins towards the south. Then the layer below has a recitivity value of 10 to 60 ohms.m is thought to be a fairly deep reservoir layer around 1500 – 3000 m, in the north the reservoir layer is getting deeper with a depth of about 2500 – 3000 m with a resistivity value of 15.2 – 80 Ohm.m. From the results of geochemical and magnetotelluric data analysis, a tentative model of the geothermal system in the research area was obtained.

Keywords : Tangkuban Perahu, Geochemical Fluid, Magnetotelluric, Geothermal

ABSTRAK

ANALISIS KARAKTERISTIK SISTEM PANAS BUMI “TP” BERDASARKAN DATA GEOKIMIA MANIFESTASI PERMUKAAN, DATA MAGNETOTELLURIK DAN TINJAUAN GEOLOGI ZONA BANDUNG

Oleh

DETRI VIKI MANDASARI

Sistem Panasbumi di Indonesia memiliki potensi yang masif, untuk identifikasi awal penelitian perlu dilakukan dengan beberapa investigasi penelitian menggunakan Konsep 3G, Geologi, Geofisika dan Geokimia. Analisis data geokimia dan magnetotellurik dilakukan untuk mengidentifikasi tipe fluida, estimasi suhu reservoir, dan sistem panasbumi yang ada pada daerah penelitian. Dalam penelitian ini, analisis dilakukan terhadap 9 titik daerah manifestasi gunungapi Tangkuban Perahu, yaitu manifestasi Batugede, Batukapur, Ciracas, Ciater, Maribaya, Domas, dan Kanchah. Terdapat 16 sampel mata air panas dan 3 lintasan pengukuran magnetotellurik yang akan digunakan untuk mengetahui informasi dan gambaran model sistem panasbumi yang ada pada daerah penelitian ini. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui informasi terkait fluida panasbumi dan keberadaan dari komponen-komponen penyusun sistem panasbumi. Hasil analisis dari data geokimia fluida menunjukkan bahwa sampel fluida yang digunakan didominasi oleh tipe fluida bikarbonat (HCO_3) yang berada pada zona *outflow* dengan kesetimbangan yang baik dan memiliki estimasi suhu reservoir berkisar 140°C - 185°C . Hasil dari model visualisasi 3D magnetotellurik menunjukkan perlapisan yang ada di daerah penelitian ini, yaitu terdapat lapisan claycap pada elevasi 500 sampai - 2000 mdpl yang ditandai dengan nilai resistivitas 1,2 – 10 Ohm.m yang semakin menebal kearah utara dan menipis kearah selatan. Kemudian lapisan dibawahnya memiliki nilai resistivitas 10 sampai 60 ohm.m diduga merupakan lapisan reservoir cukup dalam sekitar 1500 – 3000 m, di bagian utara lapisan reservoir ini semakin dalam dengan kedalaman sekitar 2500 – 3000 m dengan nilai resistivitas 15.2 – 80 Ohm.m. Dari hasil analisis data geokimia dan magnetotellurik ini kemudian diperoleh model tentatif sistem panasbumi pada daerah penelitian.

Kata kunci : Tangkuban Perahu, Geokimia fluida, 3D Magnetotellurik, Panasbumi

**ANALISIS KARAKTERISTIK SISTEM PANAS BUMI “TP”
BERDASARKAN DATA GEOKIMIA MANIFESTASI PERMUKAAN,
DATA MAGNETOTELLURIK DAN TINJAUAN GEOLOGI ZONA
BANDUNG**

**Oleh
Detri Viki Mandasari**

**Skripsi
Sebagai Salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA TEKNIK**

**Pada
Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi

**: ANALISIS KARAKTERISTIK SISTEM
PANAS BUMI "TP" BERDASARKAN DATA
GEOKIMIA MANIFESTASI PERMUKAAN,
DATA MAGNETOTELLURIK DAN TINJAUAN
GEOLOGI ZONA BANDUNG**

Nama Mahasiswa

: Detri Viki Mandasari

Nomor Pokok Mahasiswa : 1615051001

Jurusan

: Teknik Geofisika

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

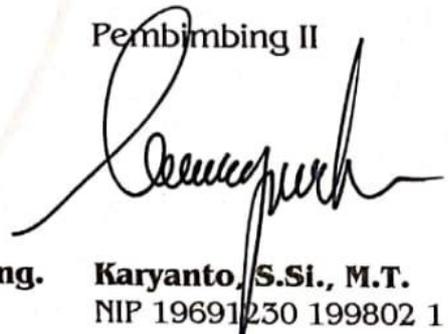
1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I



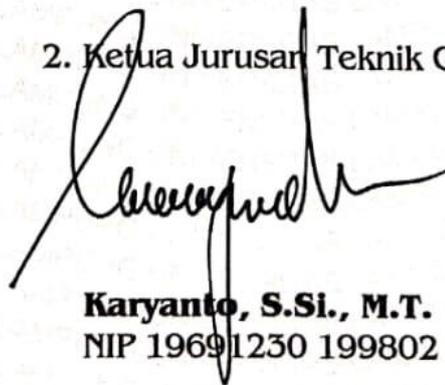
Prof. Dr. Ir. Suharno, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP 19627107 198703 1 002

Pembimbing II



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

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika



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

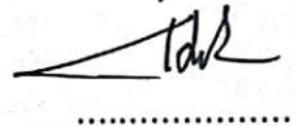
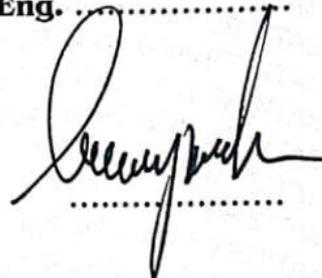
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Dr. Ir. Suharno, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng.**

Sekretaris : **Karyanto, S.Si., M.T.**

Anggota : **Dr. Ir. Nandi Haerudin, M.Si.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. ✓

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **12 Juni 2023**

PERNYATAAN KEASLIAN HASIL KARYA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Detri Viki Mandasari

NPM : 1615051001

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil kerja saya sendiri yang berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan. Karya ilmiah ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah plagiat karya lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 15 Juni 2023

Yang membuat pernyataan


Detri Viki Mandasari

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Margoyoso pada tanggal 12 Oktober 1998 dan merupakan anak bungsu dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Suparmin dan Ibu Suwarni. Penulis menempuh pendidikan formalnya dari Taman Kanak-kanan (TK) Pertiwi Dharma Wanita Wonogiri, yang diselesaikan pada tahun 2004, pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Giritontro Wonogiri Jawa Tengah dan dilanjutkan di SD Negeri 2 Dadapan Tanggamus Lampung pada tahun 2010, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Sumberejo Tanggamus Lampung pada tahun 2013, pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Sumberejo Tanggamus Lampung pada tahun 2016.

Pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi dan terdaftar sebagai mahasiswa pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif berorganisasi di internal dan eksternal kampus. Pada tahun 2017 hingga 2019 penulis tercatat sebagai anggota aktif pada Bidang Sains dan Teknologi Himpunan Mahasiswa (HIMA) Teknik Geofisika Bhuwana Universitas Lampung. Pada tahun 2017 penulis tercatat sebagai staff ahli Dinas Pengembangan Sumberdaya Mahasiswa (PSDM) Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Fakultas Teknik dan sebagai anggota aktif pada divisi *Finance and Governance American Association of Petroleum Geologist (AAPG) Universitas Lampung SC* dan di tahun selanjutnya sebagai *Vice President AAPG UNILA SC*. Aktif sebagai anggota divisi *Internal* di *Society of Exploration Geophysicists (SEG) SC Universitas Lampung*. Pada tahun 2017-2018 Penulis aktif dalam inovasi teknologi dan penelitian di Komunitas Kreativitas (KUKIS) Universitas Lampung bersama rekan-rekan Jurusan Teknik Mesin yang berfokus pada inovasi mobil hemat energi, mobil listrik, mobil proto diesel, dan mobil urban. Pada tahun 2019-2020 Penulis dipercaya menjadi Kepala Divisi Akademik dan Riset Teknologi Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia (HMGI) kabinet Tresna Ardhana. Penulis juga aktif di organisasi Eksternal, Himpunan Mahasiswa

Islam (HMI) Komisariat Teknik Universitas Lampung sebagai Wakil Sekertaris Bidang Pemberdayaan Perempuan, dan dilanjutkan sebagai Ketua Umum Korps HMI Wati (KOHATI) HMI Komisariat Teknik Unila. Selain itu, Penulis juga aktif di Organisasi Kepemudaan sebagai Wakil Bendahara Umum Pemilu dan Pilkada di DPD Komite Nasional Pemuda Indonesia (KNPI) yang periode nya belum berakhir. Penulis juga sebagai Ketua Umum DPD KAMSRI (Kesatuan Angkatan Muda Sriwijaya) Puteri Provinsi Lampung di akhir masa studi sampai 2 tahun mendatang.

Pada bulan Januari hingga Februari tahun 2019 penulis melaksanakan Kerja Praktek di P3TKEEBTKE Kementerian ESDM Jakarta Selatan dengan judul **“Pengenalan Alat Dan Percobaan Akuisisi Lapangan Menggunakan Phoenix Ssm2000 V8-6r Dan Tahap Preprosesing Data AMT (Audio Magnetotelluric)”**. Pada Bulan Juli-Agustus-September Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Kebangsaan sebagai delegasi Universitas Lampung di Kelurahan Gurabati, Kecamatan Tidore Selatan, Kota Tidore Kepulauan, Maluku Utara. Penulis juga pernah sebagai Student Volunteer *American Association Petroleum Geologist (AAPG) Indonesia* di *Indonesian Petroleum Association (IPA) Convention and Exhibition* di JCC, Jakarta pada bulan Oktober 2019. Kemudian, pada bulan Juli tahun 2022 penulis melakukan penelitian Tugas Akhir (TA) di Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung hingga akhirnya penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjananya pada bulan Maret tahun 2023 dengan judul skripsi **“Analisis Karakteristik Sistem Panas Bumi “Tp” Berdasarkan Data Geokimia Manifestasi Permukaan, Data Magnetotellurik Dan Tinjauan Geologi Zona Bandung”**

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur dan berkat rahmat *Allah SWT.*
Saya persembahkan skripsi ini kepada:

Ayah dan Ibu tercinta,

Suparmin & Suwarni

Terima kasih atas doa, kasih sayang dan segala bentuk dukungan yang telah diberikan dengan sangat tulus kepada saya. Berkat pengorbanan dan jasa kalian lah yang menghantarkan saya ke titik ini. Semoga kelak saya dapat membahagiakan dan membanggakan keluarga.

Kakak tersayang,

Mari Maysari & Mari Widodo

Terima kasih atas do'a dan dukungan yang telah kakak berikan. Terima kasih sudah menjadi panutan yang baik untuk penulis. Semoga kelak kita dapat membawa kebahagiaan dan kebanggaan pada orang tua dan keluarga.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Terimakasih atas do'a dan dukungannya selama ini. Terimakasih juga sudah menyambut, menerima, dan menjadi keluarga yang baik angkatanku. Terimakasih juga untuk abang-abang dan adik-adik untuk semua pengalaman dan pelajaran hidup. Semoga kita terus menjadi pribadi yang bermanfaat dan sukses selalu.

Universitas Lampung

Terimakasih atas pengalaman dan pelajaran hidupnya selama menempuh kuliah di Universitas Lampung. Terimakasih beasiswa dan banyak kesempatan baik yang penulis dapatkan disini. Do'akan penulis menjadi alumni yang membanggakan, terus bermanfaat dan menjadi agen perubahan yang baik.

MOTTO

"Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya"
(QS. Al-Baqarah: 286)

"Keberhasilan tidak akan datang kepada mereka yang berdiam diri, tetapi keberhasilan akan datang kepada mereka yang menjemputnya"
(HM. Jusuf Kalla)

"Dimanapun kau berkiprah tidak ada masalah, yang terpenting semangat Keindonesiaan dan Keislaman yg harus dipegang terus"
(Lafran Pane)

"Dalam narasi-narasi hidup yang nyata, perempuan menjadi kekuatan tak terbatas. Tak akan ada pemberdayaan lebih kekal berkelanjutan, tanpa melibatkan perempuan"
(Najwa Shihab)

"Jika aku berani memulai, aku harus bertahan dan menyelesaikannya sampai akhir"
(Detri Viki Mandasari)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan rahmat, hidayah dan karunia-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Tak lupa shalawat serta salam saya ucapkan kepada Nabi Muhammad Shalallaahu Alaihi Wassalaam. Sehingga skripsi yang berjudul **“Analisis Karakteristik Sistem Panas Bumi “Tp” Berdasarkan Data Geokimia Manifestasi Permukaan, Data Magnetotellurik Dan Tinjauan Geologi Zona Bandung** dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini dibuat dalam rangka memenuhi persyaratan untuk dapat menyelesaikan studi sebagai Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Dengan adanya penelitian ini penulis bisa memahami fenomena-fenomena nyata yang terjadi di alam serta dapat mengaplikasikan teori yang sudah diperoleh selama kuliah pada kegiatan eksplorasi yang sebenarnya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, diperlukan saran dan kritik yang membangun untuk perbaikan ke depannya. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 12 Juni 2023

Penulis

Detri Viki Mandasari

SANWACANA

Selama menjalani tugas akhir dan penulisan skripsi ini tentu saja tidak terlepas dari banyak pihak yang sangat membantu, bukan saja dari segi keilmuan, dan dukungan tetapi juga dari segi kehidupan yang tidak mungkin penulis dapatkan hanya di bangku kuliah saja. Oleh karena itu, penulis dengan kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada:

1. **Allah SWT.** yang telah melimpahkan rahmat, dan karunia-Nya lah penulis masih dapat bernafas dan mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Suparmin** dan Ibu **Suwarni** tercinta, Ayah **Sartono** dan Ibu **Sumiati** tersayang, terimakasih telah menjadi orang tua yang telah memberikan kasih sayang, dukungan, doa, dan segala pengorbanan yang telah dilakukan untuk penulis.
3. **Detri Viki Mandasari** yang telah berhasil bertahan dengan segala hal yang terjadi, dan tetap berusaha dalam menjalani kehidupannya sebagai mahasiswa.
4. Kakak tercinta **Nani Maysari, Nari Widodo** yang sudah memberikan doa dan semangatnya untuk penulis.
5. **Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.** sebagai Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
6. **Bapak Dr. Muhammad Irsyad, M.T, Ibu Vera Agustriana Noorhidana, M.T, Ph.D, Bapak Dr.Eng. Ageng Sadnowo R., M.T** selaku Wakil Dekan 1, Wakil Dekan 2, Wakil Dekan 3 Fakultas Teknik Unila.
7. **Bapak Karyanto, S.Si., M.T.** selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
8. **Bapak Prof. Dr. Ir. Suharno M.Sc., Ph.D, IPU Asean Eng** selaku Dosen Pembimbing 1 Tugas Akhir penulis, yang telah menyempatkan waktunya untuk memberikan ilmu, motivasi, dan arahan sehingga penulis dapat

menyelesaikan skripsi ini.

9. **Bapak Karyanto, S.Si., M.T.** selaku Dosen Pembimbing 2 Tugas Akhir penulis, yang telah menyempatkan waktunya untuk memberikan ilmu, motivasi, dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
10. **Bapak Dr. Ir. Nandi Haerudin., M.Si** selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Penguji Tugas Akhir penulis yang sudah memberikan kritik dan saran dan telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
11. **Seluruh Bapak Ibu Dosen dan Staff Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung** yang penulis hormati dan takdzimi tanpa terkecuali, yang telah memberikan ilmu, waktu, kesempatan dan bantuan selama ini.
12. **Mas-Mas Jodoh Masa Depan** selaku penyemangat dan motivator yang telah memberikan alasan penulis untuk bekerja keras dan menjadi manusia yang lebih baik lagi.
13. **Zahra Chairani, Yola Rosiana, Muhammad Adli, Igo Relindo, Mas Nanda, Farhan Yassar,** selaku mentor dan teman berdiskusi yang telah menyampaikan ilmu dan arahan yang baik dalam membantu menyelesaikan skripsi ini.
14. **Kosan Tante, Kosan Teteh, Kost Residen C03, Rusunawa, Kost Mazaya Asri** terimakasih telah menjadi tempat persinggahan dan peristirahatan yang nyaman untuk penulis selama ini. Terimakasih juga untuk para penghuni telah menjadi unsur cerita dalam kehidupan penulis.
15. **Istifani Ferucha, Etri Putriana, Yola Rosiana, Zahra Chairani, Tiara Kintani** sahabat-sahabatku **Menantu Idaman** yang menjadi kekuatan dan *support system* nomor 1 sejauh ini Terimakasih sudah menjadi tempat untuk pulang saat penulis tidak tahu tempat untuk kembali
16. **Sahabatku Bintang Anugrah Bagaskara, Awal Rifan Fathony, Syahrul Gunawan, Angga Lesmana, Arya Dillah** Terimakasih sudah berteman sejauh

ini dan menjadi tempat saat berada titik terendah kehidupan. Semoga kita semua sukses dan terus bermanfaat sebagai manusia

17. **Saudaraku Ery Setiawan, Elvilia, Raka, Agung** sobat Okediil yang sudah menjadi teman berkeluh kesah dan pertolongan diluar manusia tege.
18. **HMG I Tresna Ardhana dan seluruh isi manusia nya**, Terimakasih menjadi motivasi terbesar penulis cepat selesai Pendidikan, karena kalian keren sekali.
19. **Alvin, Ahfas, Fikri, Haqqie, Lintang, Mufido, dan Yola** selaku Tim SARJANA TEKNIK yang telah saling menyemangati dan mengingatkan satu sama lain tentang tujuan kita menjadi mahasiswa.
20. **Tim PPDG, Bapak Dr. Alimudin Muchtar., M.Si, Bapak Syamsurijal Rasimeng., M.Si.**, selaku mentor penulis dan cambuk agar penulis segera menyelesaikan tugas akhir. **Ikram, Nanda, Taufik, Joy, Andiko, Arnas, Nurul, Naira, Sebrina, Rafika, Ais Eet, Tectona, Julpan, Herlian, Fachri Cuyung** dan semua adik adik ku yang sangat membantu dalam penelitian tugas akhir ini, Terimakasih atas bantuannya meskipun kalian suka rungkad
21. **HIMA TG BHUWANA** selaku tempat yang membentuk penulis menjadi pribadi yang seperti sekarang.
22. **Kakak - kakak dan adik – adik tingkat Teknik Geofisika**, khususnya **Astri, Langnanda, Anita, Rinda, Ayu, Feby, Mala, Anung, Farhan** yang telah banyak memberikan pertolongan disaat penulis membutuhkan bantuan dan menjadi tempat berkeluh kesah di akhir masa studi.
23. Keluarga besar Teknik Geofisika 2016, **Detry, Fikri, Suci A, Mirza, Eca, Yovan, Tri Wahyu, Yuzir, Igo, Yola, Alia, Fidel, Puja, Dini, Fitria, Arel, Ikhsan, Fristi, Fachrul, Zahra, Ditha, Umam, Buyung, Eko, Etri, Ripang, David, Ribka, Jaka, Arya, Ramos, Desima, Gege, Haqqie, Sarah, Machrani, Alvin, Adli, Suci K, Puteri, Lintang, Pupu, Tiara Kintani, Clara, Iis, Bani, Nadya, Kristin, Arief, Mufido, Afifah, Tiara Nandya**. yang selalu memberikan dukungan serta semangat. Berkat dukungan dan

bantuan kalian skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

24. Keluarga Besar **HMI Komisariat Teknik Unila, Kanda, Yunda dan Adinda** yang telah menjadi tempat bertumbuh dan berproses selama menjadi mahasiswa. Terimakasih atas semua hal yang menjadi pembelajaran hidup, semoga penulis tetap hijau agar penulis tetap tumbuh.
25. **Staff Dekanat Teknik Mbak Indra, Mbak Tika, Pak Didi, Alm. Mang Udin, Mas Dito** yang telah membantu penulis dari sebelum menulis tugas akhir sampai selesai masa studi

Serta semua pihak satu persatu yang telah memberikan dukungan sehingga skripsi ini dapat selesai. Semoga Allah membalas semua kebaikan yang telah diberikan. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat bermanfaat dalam dunia ilmu Pengetahuan dan Teknologi. Semoga Allah SWT mencatat dan membalas semua kebaikan yang telah diberikan kepada penulis,

Bandar Lampung, 12 Juni 2023

Penulis

Detri Viki Mandasari

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Daerah Penelitian.....	5
2.2. Fisiografi Regional	5
2.3. Geologi dan Stratigrafi Daerah Penelitian	7
2.2.1 Struktur Geologi	7
2.4. Manifestasi.....	10
III. TEORI DASAR	12
3.1 Sistem Panas Bumi.....	12
3.2 Metode Geokimia	18
3.2.1 Keseimbangan Ion.....	19
3.2.2 Tipe Fluida Panas Bumi	20
3.2.3 Geoindikator dan <i>Tracer</i>	21
3.2.4 Geotermometer.....	24
3.3 Metode Magnetotellurik	29
3.3.1. Persamaan Maxwell	31
3.4 Model 3 Dimensi Magnetotellurik	35
IV. METODOLOGI PENELITIAN	37
4.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	37

4.2 Data dan Perangkat Lunak.....	37
4.3 Jadwal Penelitian	38
4.4 Prosedur Penelitian.....	38
4.4.1 Pengolahan Data Geokimia.....	38
4.5 Diagram Alir.....	40
V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
5.1 Karakteristik Fluida Panas Bumi.....	41
5.1.1 Keseimbangan Ion.....	42
5.2 Kualitas Fluida Panasbumi Daerah Tangkuban Perahu	45
5.2.1 Estimasi Suhu Reservoir Panasbumi Tangkuban Perahu	50
5.3 Model Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian Berdasarkan Data MT dan Geologi Daerah Penelitian.....	55
VI. KESIMPULAN	63
DAFTAR PUSTAKA	64

..

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Peta Sebaran Manifestasi Lokasi Penelitian (Saputra, 2020)	5
Gambar 2. Peta Fisiografi Jawabarat (Bemmelen, 1949).....	7
Gambar 3. Peta Struktur Geologi (ESDM & Romadoni, 2021).....	8
Gambar 4. Peta Geologi Regional Gunung Tangkuban Perahu (Modifikasi Silitonga, 1973).....	10
Gambar 5. Sistem Panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004).....	13
Gambar 6. Kondisi hidrologi dari sistem dominasi uap (Simmons, 1998).	17
Gambar 7. Kondisi hidrologi dari sistem dominasi air (Simmons, 1998).....	18
Gambar 8. Diagram segitiga Cl, SO ₄ , dan HCO ₃ (Simmons, 1998).....	22
Gambar 9. Diagram segitiga Na - K - Mg (Simmons, 1998).	23
Gambar 10. Kurva kelarutan silika terhadap suhu (Simmons, 1998).....	25
Gambar 11. Grafik penentuan suhu koreksi Mg berdasarkan hasil perhitungan geotermometer Na – K – Ca (Simmons, 1998).....	29
Gambar 12. Interaksi gelombang elektromagnetik dengan medium bawah permukaan (Modifikasi Unsworth, 2009).....	30
Gambar 13. Diagram alir penelitian	40
Gambar 14. Hasil Plot Diagram Segitiga Cl – SO ₄ – HCO ₃	47
Gambar 15. Hasil plot diagram segitiga Na – K – Mg.....	51
Gambar 16. Peta lintasan data magnetotellurik	56
Gambar 17. Visualisasi model 3D magnetotellurik.....	57
Gambar 18. Model MT Section 2D (a) Tampak Selatan (b) Tampak Utara (c) Tampak Atas	58
Gambar 19. Hasil penampang Data MT dengan rentang nilai 1,5Ω - 350 Ω.....	59
Gambar 20. Gambar Section dari Barat ke Timur.....	60
Gambar 21. Model Isosurface MT (a) Tampak Selatan (b) Tampak Utara	61

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Persamaan-persamaan geotermometer silika (Aribowo,.....	26
Tabel 2. Persamaan-persamaan geotermometer Na – K (Aribowo,.....	27
Tabel 3. Jadwal kegiatan penelitian.....	38
Tabel 4. Sampel Data Geokimia.....	42
Tabel 5. Tabel kesetimbangan Ion.....	43
Tabel 6. Hasil Perhitungan Kesetimbangan Ion	43
Tabel 7. Hasil Perhitungan Kesetimbangan Ion	44
Tabel 8. Klasifikasi tipe fluida sistem panasbumi (Simmons, 1998).....	45
Tabel 9. Presentase Kandungan Cl, HCO ₃ , dan SO ₄	46
Tabel 10. Hasil perhitungan persentase Na, K, dan Mg dari sampel fluida.....	50
Tabel 11. Temperatur reservoir	52
Tabel 12. Hasil perhitungan geotermometer Na – K.....	53

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panasbumi (*geothermal energy*) merupakan suatu energi alternatif yang bersifat dapat diperbaharui (*renewable energy*) yang bersumber dari aktivitas tektonik di dalam bumi. Energi Panasbumi adalah salah satu energi alternatif potensial yang tersebar beberapa daerah di Indonesia. Potensi panasbumi ini memiliki hubungan dengan kondisi geologi Indonesia yang merupakan daerah subduksi dan kompleks gunung api. Energi panas bumi di Indonesia digunakan untuk pembangkit listrik, namun pemanfaatannya masih belum optimal untuk pembangkit listrik. Dalam menggambarkan potensi panas bumi di suatu daerah perlu dilakukan karakterisasi melalui survei geologi, pengambilan data sampel geokimia dan pengambilan data geofisika.

Pemanfaatan persebaran potensi energi panasbumi diperlukan penelitian yang lebih lanjut mengenai potensi-potensi yang ada pada daerah tersebut. Untuk memberikan gambaran mengenai kondisi geologi permukaan di suatu daerah dilakukan survei geologi, hal ini juga berfungsi untuk mengetahui litologi daerah serta stratigrafinya, kemudian memetakan manifestasi permukaan serta struktur-struktur yang berkembang di daerah tersebut. Metode Geokimia digunakan dalam penelitian eksplorasi panasbumi untuk mendapatkan karakteristik temperatur fluida panasbumi, agar di dapatkan informasi yang berkaitan dengan jenis fluida panas bumi dan estimasi suhu reservoir sistem panas bumi. Dalam meneliti potensi panasbumi dari suatu lokasi diperlukan berbagai metode geofisika, salah satunya adalah *Magnetotelluric* (MT). Metode Magnetotellurik merupakan salah satu metode geofisika yang dipandang relevan untuk mengetahui struktur sistem bawah permukaan tanah daerah panasbumi berdasarkan nilai resistivitas batuan bawah permukaan dan dapat menggambarkan bentuk Reservoir sistem panas bumi.

Dalam penelitian ini, penggunaan data sampel geokimia regional gunung Tangkuban Parahu menjadi pendukung penelitian, yang berguna untuk mengidentifikasi informasi dan melakukan analisis yang berkaitan dengan pH, nilai besaran suhu dan jenis fluidanya, untuk di korelasikan dengan model 2D Magnetotellurik sehingga didapatkan gambaran bawah permukaan berupa model gabungan, model tentatif dari sistem panasbumi Tangkuban Parahu, sehingga selanjutnya dapat dilakukan interpretasi terpadu dengan tambahan informasi Geologi daerah khususnya Zona Bandung.

Informasi data geokimia yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Manfaat pada penelitian adalah dapat mengetahui gambaran kondisi bawah permukaan berdasarkan model gabungan data Magnetotellurik (MT), informasi tipe fluida berdasarkan perhitungan geokimia serta untuk mengetahui kondisi potensial sistem panas bumi pada daerah penelitian, selanjutnya sebagai acuan dalam proses eksplorasi lanjutan panasbumi.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik fluida panas bumi berdasarkan perhitungan *ion balance*, dan analisis menggunakan geoindikator.
2. Mengetahui kualitas fluida berdasarkan data geokimia air
3. Mengetahui model sistem panas bumi daerah penelitian
4. Menganalisis model sistem panas bumi berdasarkan nilai resistivitas dan segitiga geokimia fluida panas bumi.

1.3 Batasan Masalah

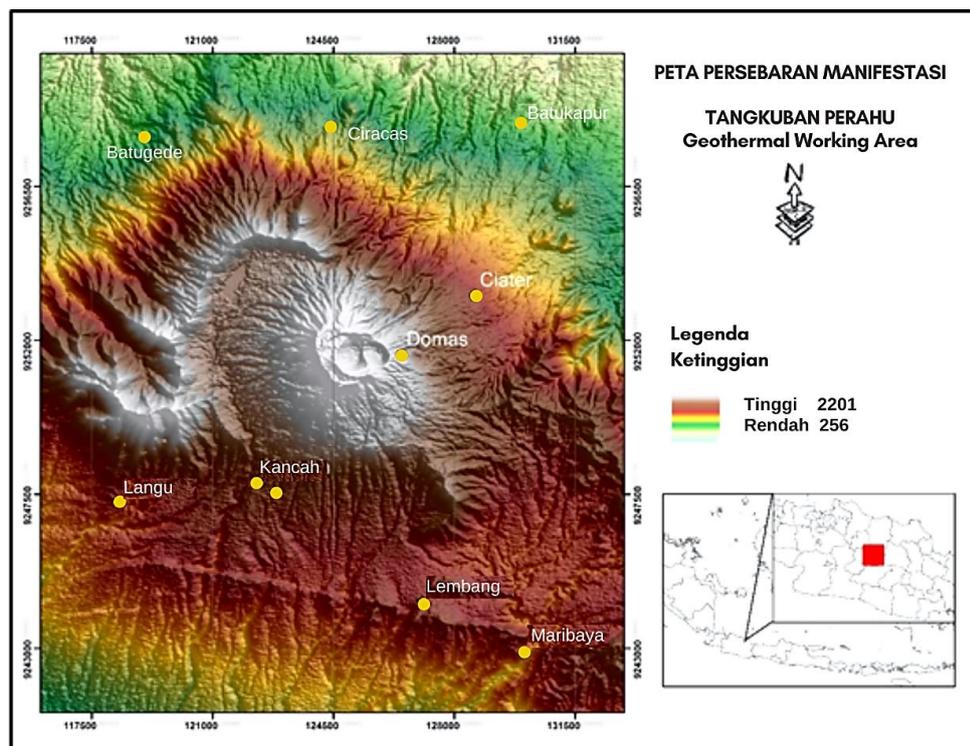
Batasan masalah pada penelitian ini pada penentuan karakteristik fluida panasbumi berdasarkan data geokimia pada titik manifestasi Batu Gede, Ciracas, Batu Kapur, Kancha, Domas, Maribaya dan Ciater dengan melakukan perhitungan *Ion Balance*, penentuan PH berdasarkan geokimia fluida (air). Dilakukan suatu analisis bawah permukaan berdasarkan data geologi zona

bandung, data geofisika berupa 2D Magnetotellurik dan data geokimia fluida (air), lalu dari data geokimia dilakukan perhitungan ion balance, penentuan pH, dan juga dikorelasikan dengan data Magnetotellurik untuk mengetahui estimasi suhu reservoir pada sistem panas bumi Tangkuban Parahu dan Sekitarnya, khususnya pada NTP – CTP – STP yang meliputi seluruh manifestasi Kancah, Maribaya, Ciater, Domas, Batu Gede, Batu Kapur, Ciracas yang termasuk kedalam Zona Bandung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Daerah Penelitian

Daerah lokasi pada penelitian ini berada pada kawasan pegunungan Tangkuban Parahu yang memiliki titik koordinat $6^{\circ} 46' 12''$ LS, $107^{\circ} 36' 0''$ BT. Gunung Tangkuban Parahu secara administratif berada di Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Adapun peta lokasi daerah penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



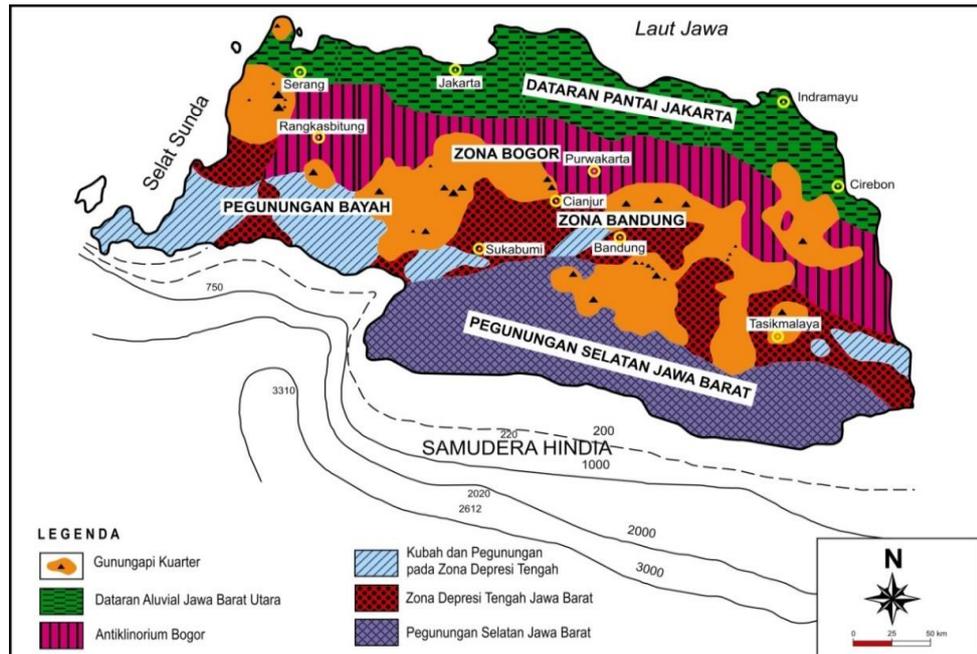
Gambar 1. Peta Sebaran Manifestasi Lokasi Penelitian (Saputra, 2020)

2.2. Fisiografi Regional

Menurut (Bemmelen, 1949) berdasarkan morfologi dan tektoniknya Jawa

Barat dibagi menjadi empat jalur fisiografi (Gambar 2), yaitu :

1. Dataran Pantai Jakarta yang menempati bagian utara Jawa Barat, memanjang dengan arah barat-timur dari Serang sampai ke Cirebon. Daerah ini disusun oleh endapan sungai, hasil erupsi gunungapi muda, endapan banjir, dan pantai.
2. Zona Bogor, terletak di sebelah selatan pantai utara, membentang dari Rangkasbitung sampai ke Bumiayu. Zona ini disusun oleh batuan yang berumur Neogen yang terlipat kuat. Zona ini telah mengalami tektonik yang kuat sehingga terlipat dan membentuk antiklinorium yang cembung ke utara dan cukup rumit. Selain itu muncul tubuh-tubuh intrusi yang umumnya berelief lebih terjal.
3. Zona Bandung merupakan jalur yang memanjang mulai dari Sukabumi sampai ke Segara Anakan di Pantai Selatan Jawa Tengah. Zona Bandung merupakan hasil depresi antara jalur-jalur pegunungan (intermountain depression) yang sering terlihat berarah barat - timur dengan dibatasi deretan gunungapi di utara dan selatannya. Zona Bandung didominasi oleh erupsi hasil gunungapi yang berumur Resen.
4. Zona pegunungan selatan Jawa Barat, terletak di sebelah selatan Jawa Barat. Jalur ini membentang dari Pelabuhan Ratu di sebelah barat sampai Pulau Nusakambangan di sebelah timur dengan lebar rata-rata 50 km. Pada ujung sebelah timur Pulau Nusakambangan terjadi penyempitan, sehingga lebarnya hanya beberapa kilometer saja.



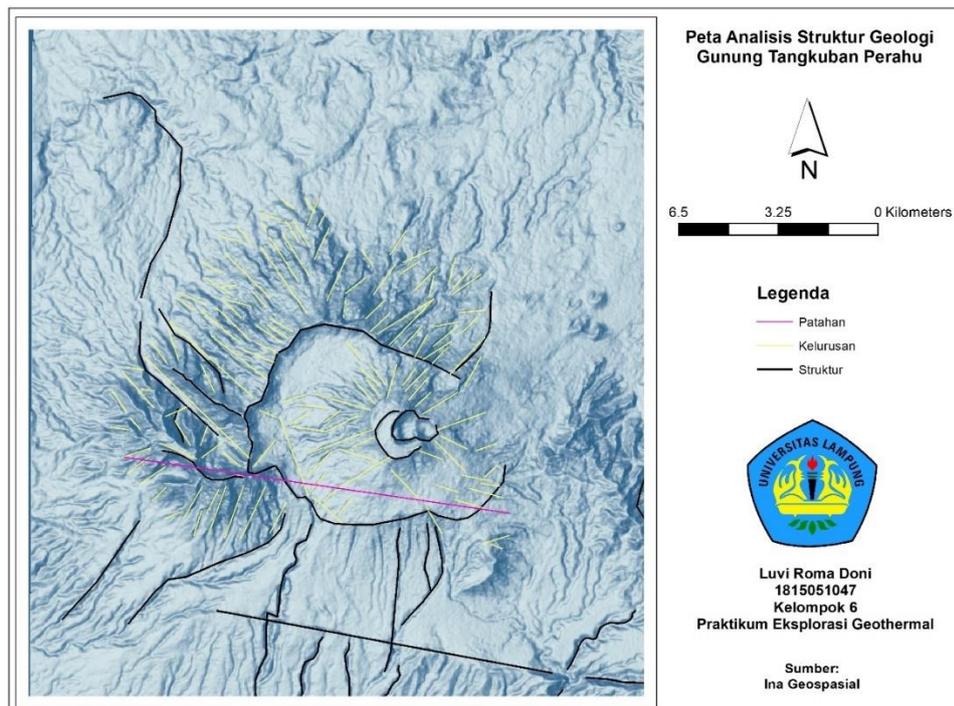
Gambar 2. Peta Fisiografi Jawa Barat (Bemmelen, 1949)

Berdasarkan pembagian zona fisiografi Jawa Barat, maka daerah penelitian secara regional termasuk ke dalam Zona Bandung.

2.3. Geologi dan Stratigrafi Daerah Penelitian

2.2.1 Struktur Geologi

Pada daerah Gunung Tangkuban Perahu, terdapat 2 tren struktur utama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu struktur WNW – ESE yang berarah Baratlaut ke Tenggara yang sangat dipengaruhi oleh tektonik regional yaitu Sesar Lembang – Tambakan dan struktur NNE – SSW yang berarah Timurlaut ke Baratdaya yang konsisten dengan patahan local dan merefleksikan kompresi Lempeng Indo – Australia di bawah lempeng Eurasia contohnya yaitu Patahan Cimandiri (KESDM, 2017).

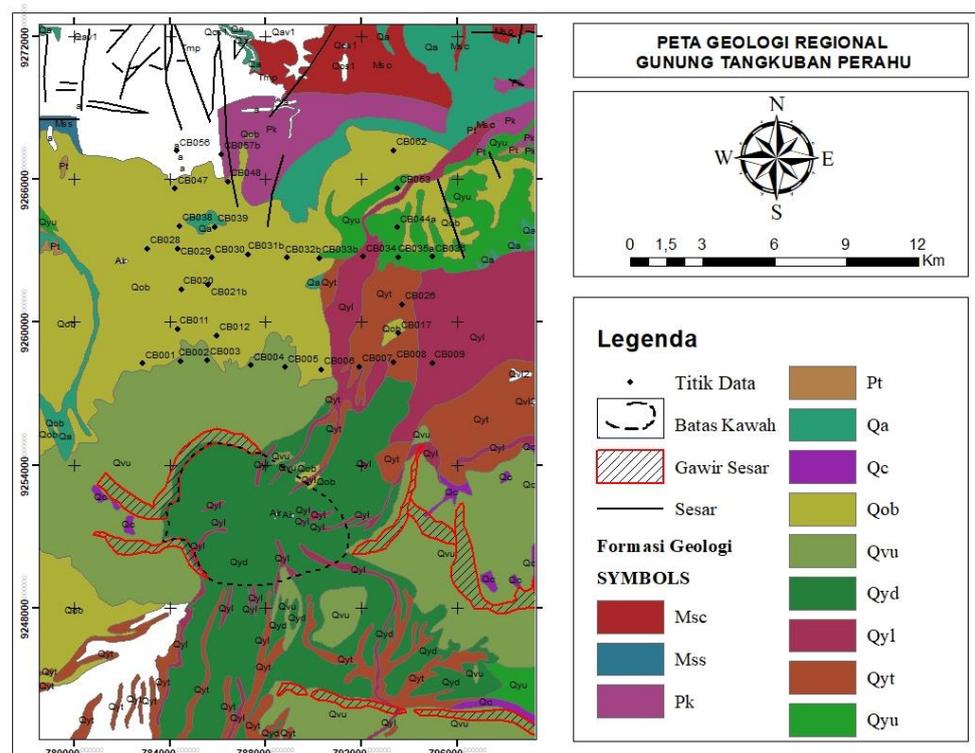


Gambar 3. Peta Struktur Geologi (ESDM & Romadoni, 2021)

Berdasarkan Peta Geologi Regional Gunung Tangkuban Perahu (P.H. Silitonga, 1973) daerah penelitian terbagi dalam beberapa satuan batuan. Satuan batuan atau stratigrafi tertua dari Gunung Tangkuban Perahu adalah Formasi Subang (Msc dan Mss) yang terdiri dari lempung serpih dan batulanau dengan sisipan tipis batupasir. Selanjutnya di atasnya terdapat Formasi Kaliwungu (Pk), Formasi Citalang (Pt), Hasil Gunungapi Lebih Tua (Qob), Hasil Gunungapi Tua Tak Teruraikan (Qvu), Hasil Gunungapi Muda Tak Teruraikan (Qyu), Tuf Berbatuapung (Qyt), Breksi dan Aglomerat (Qyb), Tuf Pasir (Qyd), Kolovium (Qc), dan Aluvium (Qa). Berikut ini merupakan penjelasan dari masing-masing satuan batuan yang ada pada Gunung Tangkuban Perahu:

1. Formasi Kaliwungu (Pk) berada pada kedalaman 600 m tersusun oleh batupasir tufan, konglomerat, betulempung, dan kadang-kadang lapisan batupasir gampingan dan batugamping. Selain itu terdapat juga lapisan tipis gambut dan lignit. Pada batupasir dan konglomerat terdapat banyak fosil moluska.

2. Formasi Citalang (Pt) pada kedalaman 500 – 600 m tersusun oleh lapisan-lapisan napal tufan, diselingi oleh batupasir tuf dan lempung tuf.
3. Satuan batuan Hasil Gunungapi Lebih Tua (Qob) pada kedalaman 600 m tersusun oleh batuan breksi, lahar, dan pasir tuf berlapis-lapis dengan kemiringan yang kecil.
4. Satuan batuan Hasil Gunungapi Tua Tak Teruraikan (Qvu) tersusun atas batuan breksi gunungapi, lahar, dan lava berselang-seling.
5. Satuan batuan Hasil Gunungapi Muda Tak Teruraikan (Qyu) tersusun oleh pasir tufan, lapili, breksi, lava, dan aglomerat yang sebagian berasal dari Gunung Tangkuban Perahu dan sebagian lagi berasal dari Gunung Tampomas antara Sumedang dan Bandung. Batuan ini membentuk dataran-dataran kecil atau bagian-bagian rata dan bukit rendah yang tertutup oleh tanah yang berwarna abu-abu kuning dan kemerahan.
6. Satuan batuan Tuf Berbatuapung (Qyt) berupa pasir tufan, lapili, bom-bom, lava berongga dan kepingan-kepingan andesit basal padat yang bersudut dengan banyak bongkahan dan pecahan batuapung. Satuan batuan ini berasal dari Gunung Tangkuban Perahu dan Gunung Tampomas.
7. Satuan batuan Breksi dan Aglomerat (Qyb) terdapat di sebelah tenggara Gunung Tampomas. Keratan-keratannya terdiri dari batuan beku bersusun antara andesit dan basal.
8. Satuan batuan Tuf Pasir (Qyd) berasal dari Gunung Dano dan Gunung Tangkuban Perahu (erupsi 'C', Van Bemmelen, 1934). Tuf pasir coklat sangat sarang, mengandung kristal-kristal horeblenda yang kasar, lahan lapuk kemerah-merahan, lapisan-lapisan lapili, dan breksi.
9. Satuan batuan Kolovium (Qc) utamanya berasal dari reruntuhan pegunungan hasil gunungapi tua, berupa bongkahan batuan beku antara andesit-basal, breksi, batupasir tuf, dan lempung tuf.
10. Satuan batuan Aluvium (Qa) terdiri dari batu lempung, lanau, pasir dan kerikil, terutama endapan sungai sekarang.



Gambar 4. Peta Geologi Regional Gunung Tangkuban Perahu (Modifikasi Silitonga, 1973)

2.4. Manifestasi

Manifestasi panasbumi yang berasosiasi dengan sistem vulkanik, terutama gunungapi bertipe strato umumnya berada di puncak gunung dan merupakan daerah pusat erupsi vulkanik. Manifestasi yang umumnya sering muncul antara lain: mata air panas, fumarola, solfatara dan kolam lumpur (*mud pools*). Sedangkan di daerah lereng gunung, manifestasi yang umum ditemukan yaitu berupa mata air panas yang bersifat asam maupun basa. Nasution dkk (2004), membagi zona manifestasi pada Gunungapi Tangkuban Perahu dalam tiga bagian, yaitu *Central of* Tangkuban Perahu (CTP), *North of* Tangkuban Perahu (NTP), dan *South of* Tangkuban Perahu (STP).

Zona manifestasi *Central of* Tangkuban Perahu (CTP) berada di tengah Gunung Tangkuban Perahu, manifestasinya berupa mata air panas dan fumarola yang muncul di dalam Kawah Domas, memiliki temperatur 90° - 95°C. Terdapat pula fumarola di *central vent* dari Gunung Tangkuban Perahu yang memiliki temperatur 95° - 100°C dan ditemukan sedikit endapan sulfur. Zona manifestasi

North of Tangkuban Perahu (NTP) berada di bagian utara dari Gunung Tangkuban Perahu, memiliki manifestasi berupa mata air panas Ciater, mata air hangat Batugede, mata air panas Batukapur, dan mata air panas Ciracas. *South of* Tangkuban Perahu (STP) di bagian selatan Gunung Tangkuban Perahu memiliki manifestasi berupa mata air panas Maribaya dan Cimanggu serta adanya pelepasan panas di daerah Kanchah.

III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panas Bumi

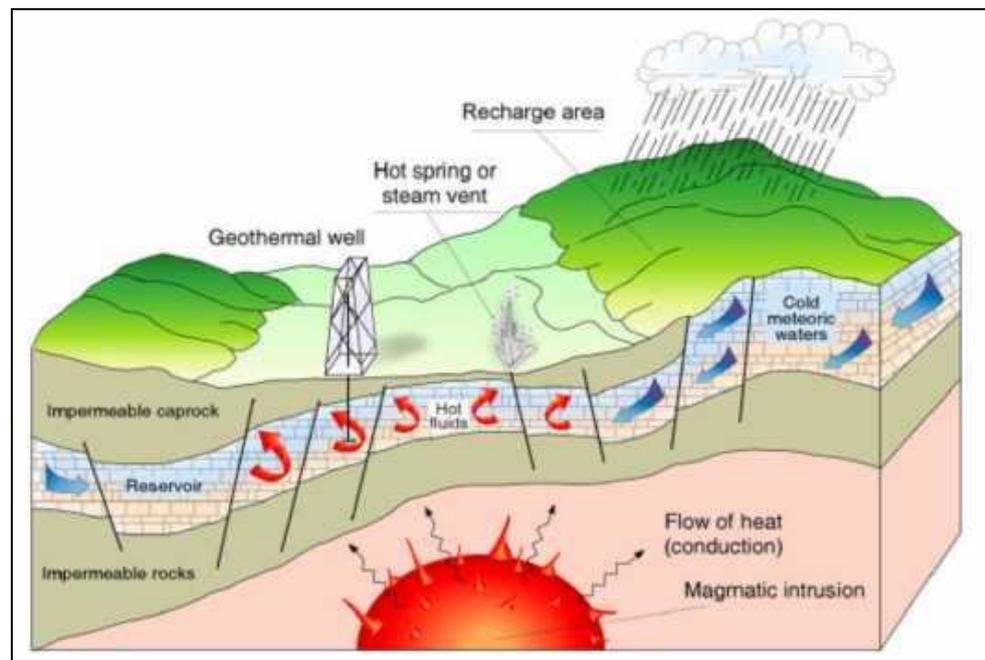
Lapangan energi panas bumi atau geothermal merupakan suatu energi alternatif yang bersifat *renewable* (dapat diperbaharui), yang bersumber dari aktivitas tektonik di dalam bumi. Sumber energi panas bumi di Indonesia tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Keberadaan sesar menjadi kontrol dalam siklus hidrologi pada daerah panas bumi. Dalam mengidentifikasi sesar dan pengontrol sistem panas bumi yang lain dari suatu lokasi diperlukan metode geofisika yang relevan untuk menggambarkan sistem yang mengontrol panas bumi. Potensi ini terkait dengan kondisi geologi Indonesia yang merupakan daerah subduksi dan gunungapi (Haerudin dkk., 2017).

Panasbumi merupakan suatu energi yang terbentuk secara alami dan tersimpan dalam bentuk air atau berupa uap panas pada kondisi geologi tertentu pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Sistem panasbumi didefinisikan oleh Hochstein dan Browne (2000) sebagai perpindahan panas yang terjadi secara alami dalam volume tertentu di kerak bumi dimana panas akan dipindahkan dari sumber panas ke zona pelepasan panas.

Sistem panasbumi disusun oleh beberapa parameter kebumihan, seperti adanya sumber panas (*heat source*), reservoir, batuan penudung (*cap rock*), sumber fluida, dan siklus hidrologi. Sumber panasbumi berasal dari dapur magma yang berada di bawah permukaan bumi, panas ini akan mengalir ke batuan sekitarnya melalui proses konveksi dan konduksi. Ketika air mengalir sampai

ke sumber panas (*heat source*) maka temperatur air akan meningkat. Ketika temperatur yang diterima oleh air tinggi, maka sebagian air akan menguap dan sebagiannya lagi akan tetap menjadi air. Fluida dengan temperatur tinggi ini akan menekan batuan disekitarnya untuk mencari celah batuan dan melepaskan tekanan. Ketika terdapat celah untuk mengeluarkan fluida, maka fluida ini akan bergerak naik dan keluar sebagai manifestasi permukaan.

Sebagian fluida yang terperangkap di bawah batuan *impermeable* akan mengalami akumulasi panas yang selanjutnya disebut sebagai reservoir. Proses akumulasi panas ini akan mengakibatkan batuan *impermeable* di atasnya mengalami perubahan struktur dan sifat batuan. Batuan yang mengalami perubahan ini disebut batuan alterasi yang dalam sistem panasbumi berfungsi sebagai batuan penudung (*claycap*) untuk menjaga proses akumulasi panas di reservoir (Goff dan Janik, 2000).



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

Pada dasarnya sistem panasbumi merupakan daur hidrologi air (air tanah dan hujan) yang dalam perjalanannya berhubungan dengan sumber panas (*heat source*) bertemperatur tinggi, sehingga terbentuk air panas yang dapat

terperangkap dalam batuan yang porous dan memiliki permeabilitas tinggi (Karyanto, 2003). Perpindahan panas pada sistem panasbumi dari sumber panas ke sekitarnya terjadi secara konveksi dan konduksi. Perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas, sedangkan perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan (Budihardi dkk, 1997).

Menurut Suharno (2010), komponen-komponen penting yang mengontrol sistem panasbumi adalah:

1. Sumber panas (*heat source*) berupa plutonik,
2. Batuan berporos atau reservoir tempat uap panas terjebak di dalamnya,
3. Lapisan penutup (*caprock*) berupa batu lempung,
4. Struktur geologi (patahan, perlipatan, *collapse*, rekahan dan ketidakselarasan)
5. Daerah resapan air atau aliran air bawah permukaan (*recharge area*).

Keberadaan suatu sistem panasbumi biasanya dicirikan dengan adanya manifestasi di permukaan. Menurut Suharno (2012) beberapa manifestasi permukaan yang menunjukkan adanya sistem panasbumi adalah sebagai berikut:

a. Mata air panas (*Hot spring*)

Batuan dalam dapur magma dapat menyimpan panas hingga ribuan tahun. Air tanah yang turun dan bersentuhan dengan magma akan terpanaskan. Air yang panas cenderung akan naik ke permukaan melalui celah-celah rekahan. Air panas yang muncul di permukaan disebut sumber mata air panas (*hot spring*).

b. Fumarola dan solfatara

Fumarola merupakan lubang asap tempat dikeluarkannya gas-gas yang dihasilkan oleh gunung api. Umumnya fumarola ditemukan pada daerah gunung api. Sedangkan solfatara merupakan fumarola yang mengandung gas belerang (*sulfur*), seperti SO₂, H₂S, dan S.

c. *Geyser*

Geysir adalah air tanah yang tersembur keluar sebagai kolom uap dan kolom air panas. Kolom tersebut terbentuk oleh adanya celah yang terisi air dari kawah dan kemudian terdorong ke atas oleh tekanan uap air. Semakin banyak akumulasi air di dalam celah, maka semakin kuat tekanan uap air sehingga semakin tinggi air yang tersembur ke atas.

d. Uap tanah (*Steaming ground*)

Uap panas yang nampak keluar dari permukaan tanah (*steaming ground*) sering ditemui di beberapa lapangan panasbumi. Uap panas tersebut diperkirakan berasal dari lapisan yang berada di dekat permukaan yang mengandung air panas yang suhunya mendekati titik didihnya (*boiling point*), sehingga terjadi penguapan di atas permukaan.

e. Lumpur panas

Lumpur panas merupakan manifestasi panasbumi di permukaan yang umumnya mengandung uap panas yang tidak terlalu banyak dan gas CO₂ yang tidak mudah menjadi cair. Lumpur panas ditemukan dalam keadaan cair karena kondensasi uap. Sedangkan gelembung-gelembung yang terjadi disebabkan oleh keluarnya gas CO₂.

f. Kawah (*Crater*)

Kawah merupakan suatu bentuk depresi yang berbentuk corong terbuka ke atas yang merupakan tempat disemburkannya tepra gas-gas, lava, dan gas-gas.

g. Batuan alterasi

Batuan alterasi merupakan tanda-tanda penting adanya lapangan panasbumi. Batuan alterasi terjadi karena proses interaksi antara batuan asal dengan fluida panasbumi. Batuan alterasi terjadi karena beberapa factor, antara lain suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi fluida, pH, dan lamanya interaksi.

Hochstein dan Browne (2000), mengategorikan 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 *magmatic* yang naik kemudian bercampur dengan air *meteoric*.

Klasifikasi temperatur suatu sistem panasbumi menurut Hochstein dan Soengkono (1997) terbagi menjadi tiga berdasarkan temperatur reservoir:

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

Berdasarkan fase fluida di dalam reservoir, sistem panasbumi terbagi menjadi dua (Simmons, 1998), yaitu:

1. *Single Phase System*

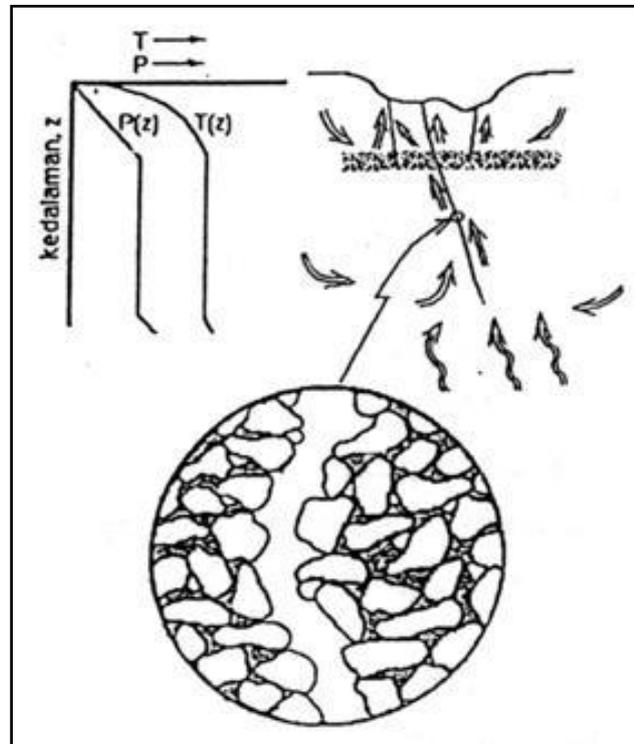
Reservoir mengandung air panas dengan temperatur sekitar 90°C sampai 180°C dan tidak ada pendidihan yang terjadi di reservoir. Reservoir pada sistem panasbumi ini termasuk memiliki temperatur rendah. Jika reservoir ini dibor, maka yang keluar berupa air karena rekahannya masih sangat tinggi.

2. *Two Phase System*

- a. *Vapour Dominated System*

Merupakan sistem tertutup dimana sangat sedikit *rechargeable water*, air dapat meresap namun sangat lama karena berputar-putar di reservoir dan tidak ada *outflow* sehingga mengakibatkan adanya arus konveksi. Lama-kelamaan hal ini akan mengakibatkan batuan reservoir menjadi homogen dan temperatur maupun tekanan fluida menjadi relatif konstan. Fluida di

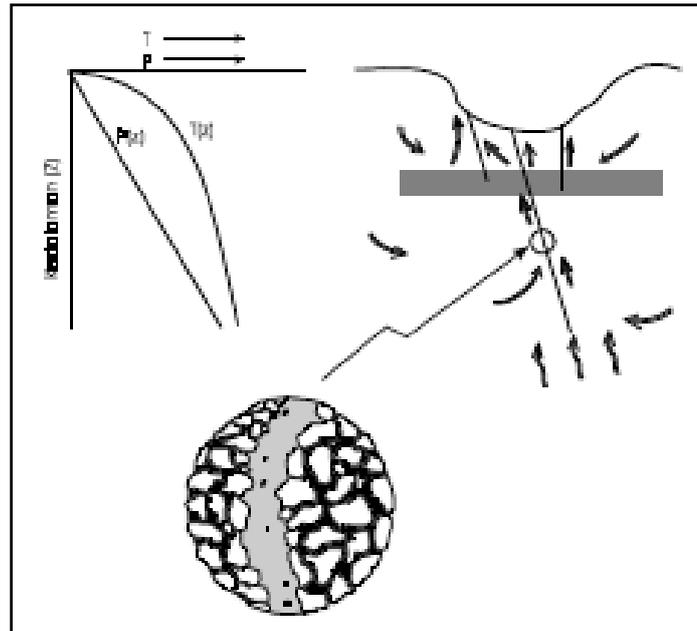
reservoir yang didominasi uap akibat temperatur dan tekanan yang sangat tinggi, menghasilkan manifestasi berupa fumarola dan *acid hot spring*.



Gambar 6. Kondisi hidrologi dari sistem dominasi uap (Simmons, 1998).

b. *Water Dominated System*

Merupakan sistem terbuka yang terdapat *rechargeable water*. Reservoir ini mengandung air dan uap namun lebih di dominasi 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.



Gambar 7. Kondisi hidrologi dari sistem dominasi air (Simmons, 1998).

Sistem panasbumi memiliki karakteristik yang berbeda-beda, tidak hanya pada manifestasi di permukaan, tetapi juga pada karakteristik reservoarnya. Perbedaan sistem panasbumi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti topografi, hidrologi permukaan, struktur geologi, permeabilitas, dan ukuran batuan sumber panas. Sistem panasbumi di Indonesia umumnya memiliki suhu yang cukup tinggi karena berkaitan dengan kegiatan gunungapi muda. Terjadinya sumber energi panasbumi berhubungan erat dengan sistem tektonik lempeng yang aktif di wilayah Indonesia. Ada tiga lempeng yang berinteraksi di Indonesia, yaitu lempeng Pasifik, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Eurasia. Tumbukan ketiga lempeng tersebut mengakibatkan sebagian lempeng menunjam pada bagian lempeng yang lain sehingga muncul gunungapi-gunungapi di sepanjang daerah penunjaman (Suharno, 2013).

3.2 Metode Geokimia

Metode geokimia dalam penelitian eksplorasi panasbumi digunakan untuk mengkaji kemungkinan pengembangan sumber panasbumi. Data yang sering digunakan dalam metode geokimia adalah data kimia fluida panasbumi, data isotop, data kimia tanah dan gas tanah. Data tersebut digunakan untuk mengkaji

kemungkinan pengembangan sumber daya panasbumi yang meliputi beberapa parameter seperti (Hutapea, 2010):

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

Fluida-fluida panasbumi cenderung memiliki kandungan senyawa yang hampir sama dan memiliki konsentrasi yang bervariasi. Variasi tersebut disebabkan oleh beberapa hal yaitu suhu, komposisi magma pada *heat source*, jenis batuan / litologi yang dilewati fluida, kondisi dan lamanya interaksi fluida dengan batuan, proses *boiling* dan *mixing*. Zat terlarut dalam fluida panasbumi berasal dari interaksi antara batuan dan fluida. Unsur terlarut dalam fluida panasbumi dapat dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan sifat muatan elektriknya, yaitu senyawa kation, anion, dan senyawa netral (Simmons dalam Ningsih, 2018).

3.2.1 Kesetimbangan Ion

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

$$mi = \frac{1000 Ci}{MWi (1000000 - \Sigma Ci)} \quad (1)$$

Setelah diperoleh jumlah *meq* dari seluruh kation dan anion dari senyawa-senyawa, kemudian dilakukan perhitungan kesetimbangan ion dengan persamaan:

$$\Delta \text{ charge } \% = \frac{\Sigma kation + \Sigma anion}{|\Sigma kation + \Sigma anion|} \times 100 \quad (2)$$

Suatu hasil analisis kimia dikatakan layak jika kesetimbangan ini tidak lebih dari 5%. Namun tidak berarti bahwa hasil analisa diatas 5% tidak layak digunakan dalam interpretasi. Mata air panas dengan kesetimbangan ion > 5% sangat dipengaruhi oleh tipe dan proses yang dialami fluida tersebut (Nicholson, 1993).

3.2.2 Tipe Fluida Panas Bumi

Analisis geokimia fluida panasbumi yang paling sederhana dan berfungsi secara cepat untuk mengenali variasi fluida adalah klasifikasi menggunakan komposisi anion (senyawa bermuatan negatif). Klasifikasi beberapa tipe fluida panasbumi antara lain yaitu:

a. Air Klorida

Air klorida merupakan fluida yang paling dominan pada kebanyakan lapangan panasbumi. Air jenis ini diprediksi berasal dari bagian dalam reservoir, bersifat netral atau dapat pula sedikit asam atau sedikit basa. Pada manifestasi permukaan dicirikan oleh kenampakannya yang jernih dan sering berasosiasi dengan endapan silika sinter. Air klorida di dekat permukaan sering mengandung CO₂, H₂S, dan sulfat yang signifikan, sedangkan di dalam reservoir perbandingan atau rasio Cl/SO₄ tinggi.

b. Air Asam Sulfat

Pada jenis air ini, kandungan klorida rendah, sementara kandungan sulfat tinggi, Al dan Fe cukup tinggi. Air asam sulfat biasanya terdapat pada sistem panasbumi di daerah vulkanik, dimana uap air berkondensasi ke air tanah. Kandungan sulfat yang tinggi berasal dari oksidasi H₂S pada zona vados. Karena terbentuk pada zona vados maka air asam sulfat hanya dapat memberikan sedikit informasi tentang bagian dalam sistem panasbumi. Ciri fisik dari fluida ini biasanya berwarna keruh dengan kandungan Al dan Fe yang cukup tinggi yang mengindikasikan adanya pelarutan batuan, hal ini disebabkan karena fluida jenis ini cenderung reaktif terhadap batuan yang dilewatinya.

c. Air Bikarbonat

Fluida jenis ini dicirikan dengan kandungan Cl yang rendah, kandungan sulfat juga rendah, dan bikarbonat (HCO_3) sebagai anion utamanya. Pada sistem panasbumi yang berasosiasi dengan batuan vulkanik biasanya air bikarbonat terbentuk pada bagian yang dangkal dan margin bawah permukaan dimana gas CO_2 terserap dan uap terkondensasi di bawah muka air tanah. Pada sistem panasbumi yang berasosiasi dengan batuan sedimen, pembentukan fluida jenis ini dikontrol oleh keberadaan batu gamping. Air bikarbonat cenderung sedikit asam dan bisa juga netral atau sedikit basa.

d. *Brine*

Fluida ini terbentuk dengan berbagai cara seperti pelarutan sekuen endapan evaporit oleh air meteorik, terperangkapnya *connate water* pada cekungan sedimentasi serta proses-proses lainnya. *Brine* merupakan larutan yang memiliki konsentrasi tinggi, pH menunjukkan asam lemah dengan unsur utama adalah Cl (10000 hingga > 100000 ppm). Konsentrasi Na, K, dan Ca tinggi, densitas *brine* biasanya tinggi sehingga tidak muncul di permukaan (Simmons, 1998).

3.2.3 Geoindikator dan *Tracer*

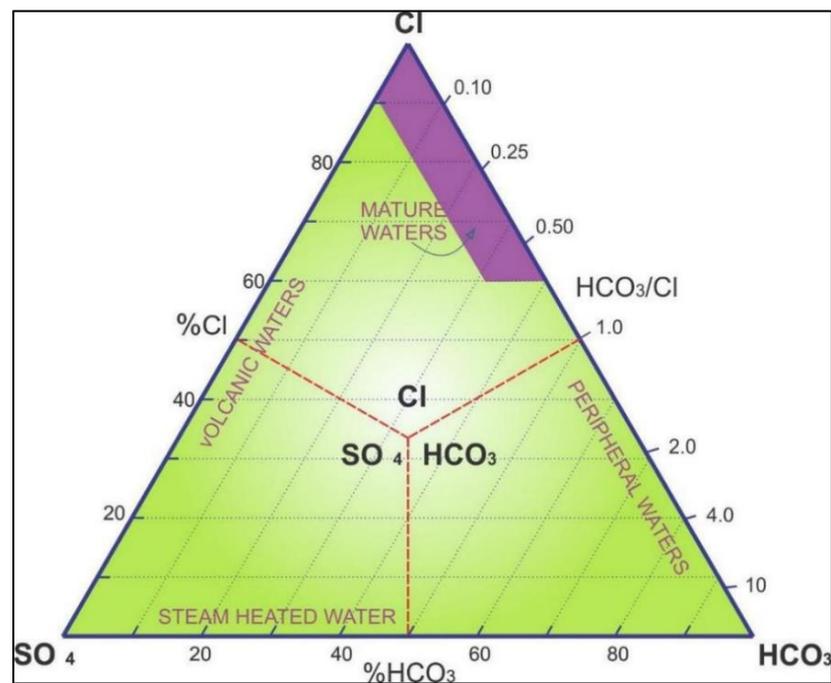
Zat-zat terlarut terbagi dalam dua kategori, yaitu geoindikator dan *tracer*. Geoindikator adalah zat terlarut yang bersifat reaktif dan mencerminkan lingkungan ekuilibrium / kesetimbangan, misalnya Na dan K. *Tracer* secara geokimia bersifat *inert* (misalnya Li, Rb, Cs, Cl, dan B) yang bila ditambahkan ke dalam fluida akan bersifat tetap dan dapat dilacak asal-usulnya. Penggunaan Cl, B, Li, Na, K, dan Mg sebagai geoindikator dan *tracer* diterapkan dengan metode *plotting* pada diagram segitiga (*ternary plot*). *Plotting* ini merupakan cara yang tepat untuk mengkaji aspek kimia fluida mata air panas maupun fluida sumur panasbumi (Aribowo, 2011).

a. Diagram Segitiga Cl – SO_4 – HCO_3

Komponen anion yang berupa Cl, SO_4 , dan HCO_3 digunakan untuk mengetahui komposisi fluida panasbumi karena anion-anion tersebut

merupakan zat terlarut yang paling banyak dijumpai dalam fluida panasbumi. Cl , SO_4 , dan HCO_3 dapat digunakan untuk menginterpretasi kondisi dan proses yang berlangsung di dekat permukaan (kurang dari 1 km) (Herdianita dan Priadi, 2008).

Konsentrasi nilai Cl yang tinggi dalam suatu mata air mengindikasikan air tersebut berasal langsung dari reservoir, dengan minimal pencampuran atau pendinginan secara konduksi. Kadar Cl rendah pada air (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 1000 mg/kg adalah khas dari klorida jenis air.



Gambar 8. Diagram segitiga Cl , SO_4 , dan HCO_3 (Simmons, 1998).

Plotting ke diagram segitiga Cl , SO_4 , dan HCO_3 pada **Gambar 8** dilakukan agar mempermudah dalam pengelompokan serta pemeriksaan *trend* sifat kimia fluida. Posisi data pada diagram segitiga ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S = [Cl] + [SO_4] + [HCO_3] \quad (3)$$

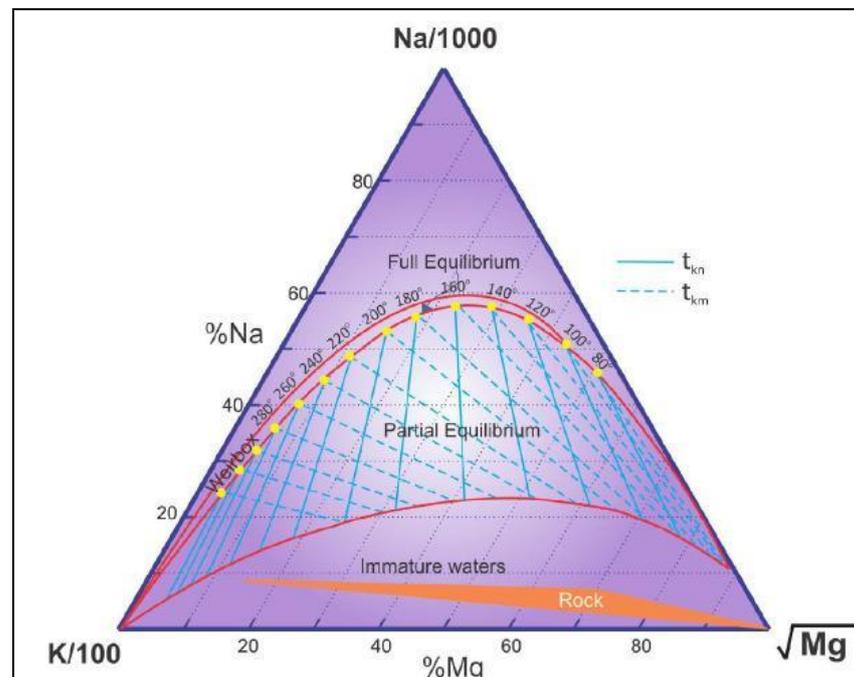
$$\% Cl = \frac{100 [Cl]}{S} \quad (4)$$

$$\% SO_4 = \frac{100 [SO_4]}{S} \quad (5)$$

$$\% HCO_3 = \frac{100 [HCO_3]}{S} \quad (6)$$

b. Diagram Segitiga Na - K - Mg

Plot segitiga Na - K - Mg memberikan penilaian lebih lanjut dari kesesuaian analisis air untuk aplikasi geoindikator zat terlarut ionik. Konsentrasi Na dan K dikontrol oleh interaksi fluida dengan batuan yang bergantung pada suhu. Na merupakan kation utama pada fluida panasbumi. Rasio Na/K semakin kecil, biasanya menunjukkan suhu semakin tinggi. Mg pada fluida hidrotermal bersuhu tinggi memiliki konsentrasi rendah. Konsentrasi Mg yang tinggi mengindikasikan adanya pelarutan batuan di dekat permukaan oleh air meteorik kaya Mg (Aribowo, 2011).



Gambar 9. Diagram segitiga Na - K - Mg (Simmons, 1998).

Untuk melakukan *plotting* pada diagram segitiga Na - K - Mg pada Gambar 9 dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$S = \left(\frac{[Na]}{1000}\right) + \left(\frac{[K]}{100}\right) + [Mg]^{1/2} \quad (7)$$

$$\% Na = \frac{100 \left(\frac{[Na]}{1000}\right)}{S} \quad (8)$$

$$\% Mg = \frac{100 [Mg]^{1/2}}{S} \quad (9)$$

3.2.4 Geotermometer

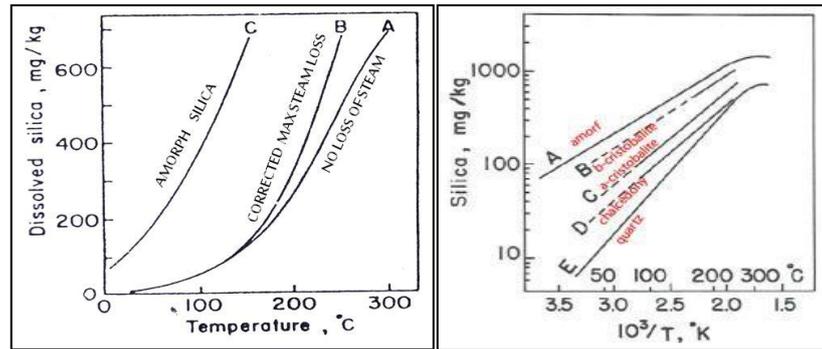
Geotermometer merupakan cara untuk memperkirakan temperatur reservoir panasbumi berdasarkan pada keberadaan zat-zat terlarut pada fluida panasbumi, dimana konsentrasi fluida sangat bergantung pada temperatur. Setiap geotermometer memiliki keterbatasan sehingga harus diperhatikan dalam penggunaannya untuk menghindari kekeliruan dalam interpretasi. Berikut ini beberapa jenis geotermometer, yaitu:

a. Geotermometer silika

Geotermometer silika dibuat berdasarkan kelarutan berbagai jenis silika dalam air sebagai fungsi dari suhu yang ditentukan berdasarkan simulasi / eksperimen. Reaksi yang menjadi dasar pelarutan silika dalam air adalah:



Pada kebanyakan sistem panasbumi, fluida di kedalaman mengalami ekuilibrium dengan kuarsa. Pada fluida reservoir bersuhu $> 220^\circ\text{C}$ kuarsa dapat mengendap akibat pendinginan secara perlahan, apabila pendinginan berlangsung dengan sangat cepat maka yang terbentuk atau mengendap adalah silika amorf. Berdasarkan data simulasi variasi kelarutan atau konsentrasi silika terhadap variasi suhu maka dapat diperkirakan besarnya suhu fluida.



Gambar 10. Kurva kelarutan silika terhadap suhu (Simmons, 1998).

Dari kurva pada Gambar 10 terlihat bahwa pada suhu rendah silika amorf lebih mudah larut dibandingkan kuarsa. Secara umum kelarutan silika dikontrol oleh silika amorf pada suhu rendah dan dikontrol oleh kuarsa pada suhu tinggi. Suhu batas untuk geotermometer silika sekitar 250°C, karena di atas suhu ini silika akan larut dan mengendap lebih cepat serta semakin konstan sebagai cairan yang dikeluarkan ke permukaan. Fluida yang mengalami pendinginan adiabatik (*max steam loss*) diterapkan untuk fluida yang mengalami kehilangan uap karena proses *boiling* yang menyebabkan meningkatnya kandungan silika pada fluida sisa. Sedangkan fluida yang mengalami pendinginan konduktif (*no steam loss*) mewakili kondisi kelarutan silika yang hanya dikontrol oleh pendinginan konduktif yang dialami fluida yang naik ke permukaan. Geotermometer kuarsa baik digunakan untuk reservoir bersuhu > 150°C. Pada reservoir dengan suhu dibawah 150°C kandungan silika dikontrol oleh kalsedon (Aribowo, 2011).

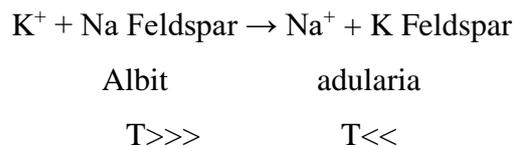
Persamaan geotermometer silika yang dikembangkan berdasarkan pendekatan terhadap nilai kurva kelarutan macam-macam mineral silika ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan-persamaan geotermometer silika (Aribowo, 2011)

Geotermometer	Persamaan	Referensi
<i>Quartz-no steam loss</i>	$T = 1390 / (5,19 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)
<i>Quartz-maximum steam loss</i>	$T = 1522 / (5,75 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)
<i>Quartz</i>	$T = 42,198 + 0,28831 \text{SiO}_2 - 3,6686 \times 10^{-4} (\text{SiO}_2)^2 + 3,1665 \times 10^{-7} (\text{SiO}_2)^3 + 77,034 \log \text{SiO}_2$	Fournier dan Potter (1982)
<i>Quartz</i>	$T = 53,500 + 0,11236 \text{SiO}_2 - 0,5559 \times 10^{-4} (\text{SiO}_2)^2 + 0,1772 \times 10^{-7} (\text{SiO}_2)^3 + 88,390 \log \text{SiO}_2$	Arnorson (1985)
<i>Chalcedony</i>	$T = 1032 / (4,69 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)
<i>Chalcedony</i>	$T = 1112 / (4,91 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Arnorson (1983)
<i>Cristobalite</i>	$T = 1000 / (4,78 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)
<i>Opal</i>	$T = 781 / (4,51 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)
<i>Amorphous silica</i>	$T = 731 / (4,52 - \log \text{SiO}_2) - 273,15$	Fournier (1977)

b. Geotermometer Na – K

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



Geotermometer Na – K dapat diterapkan untuk reservoir air klorida dengan suhu $> 180^\circ\text{C}$. Geotermometer ini memiliki keunggulan yaitu tidak banyak terpengaruh oleh *dilution* maupun *steam loss*. Geotermometer ini kurang bagus diterapkan pada suhu $< 100^\circ\text{C}$, juga untuk reservoir yang mengandung banyak Ca dan berasosiasi dengan endapan travertin. Tabel 2 berikut ini akan menampilkan beberapa persamaan yang digunakan dalam geotermometer Na – K (Aribowo, 2011).

Tabel 2. Persamaan-persamaan geotermometer Na – K (Aribowo, 2011).

Persamaan	Referensi
$T = [855,6 / (0,857 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Truesdell (1976)
$T = [833 / (0,780 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Tonani (1980)
$T = [1319 / (1,699 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Arnorsen et all (1983)
$T = [1217 / (1,483 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Fournier (1979)
$T = [1178 / (1,470 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Nieva & Nieva (1987)
$T = [1390 / (1,750 + \log (\text{Na}/\text{K}))] - 273,15$	Giggenbach (1988)

c. Geotermometer Na – K – Ca

Geotermometer Na – K – Ca ini diterapkan untuk air yang memiliki konsentrasi Ca tinggi. Geotermometer ini bersifat empiris dengan landasan teori yang belum dipahami secara sempurna. Batasan teoritis untuk geotermometer ini adalah ekuilibrium antara Na dan K Feldspar serta konversi mineral kalsium alumino silikat (misalnya plagioklas)

menjadi kalsit. Asumsi yang digunakan dalam membuat persamaan geotermometer Na – K – Ca adalah sebagai berikut:

1. Ada kelebihan silika
2. Aluminium tetap berada pada fasa padat (fluida mengandung sedikit Al)

Rumus persamaan untuk geotermometer ini adalah:

$$T = [1647 / \log (\text{Na/K}) + \beta (\log (\text{Ca/Na}) + 2,06) + 2,47] - 273,15$$

Ada dua uji untuk menerapkan geotermometer ini:

1. Jika $[\log (\text{Ca/Na}) + 2,06] < 0$, gunakan $\beta = 1/3$ dan hitung $T^{\circ}\text{C}$
2. Jika $[\log (\text{Ca/Na}) + 2,06] > 0$, gunakan $\beta = 4/3$ dan hitung $T^{\circ}\text{C}$, jika T terhitung $< 100^{\circ}\text{C}$ maka hasil dapat diterima, namun jika hasil perhitungan $T > 100^{\circ}\text{C}$ maka dilakukan perhitungan ulang $T^{\circ}\text{C}$ dengan $\beta = 1/3$ (Aribowo, 2011).

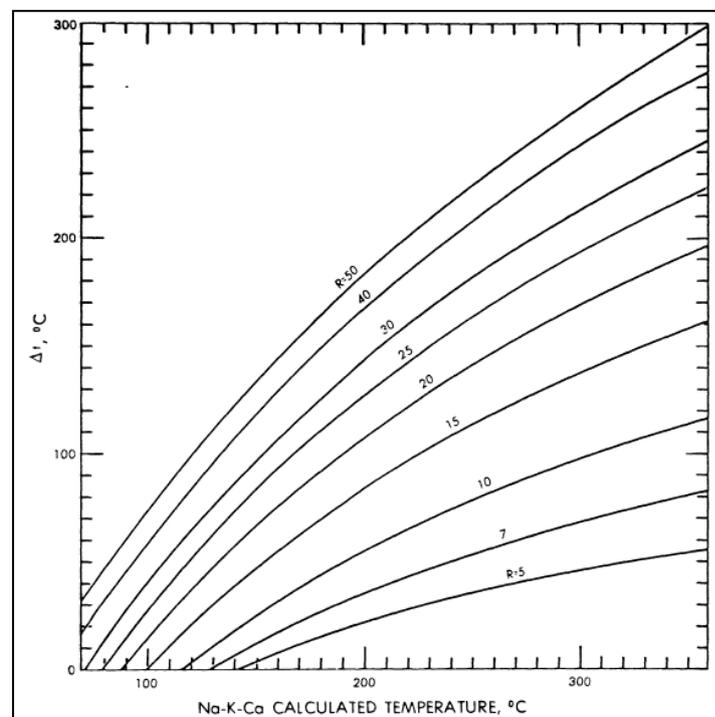
Kisaran suhu yang bagus untuk geotermometer Na – K – Ca adalah 120 - 200 $^{\circ}\text{C}$, selebihnya kurang bagus. Keterbatasan lain dari geotermometer ini adalah suhu sangat dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi karena *boiling* dan *dilution*. *Boiling* menyebabkan kehilangan CO_2 , terjadinya pengendapan kalsit, dan Ca keluar dari larutan sehingga menyebabkan suhu hasil perhitungan terlalu tinggi.

Fluida panasbumi dengan suhu $> 180^{\circ}\text{C}$ sering mengandung sedikit Mg (, 0,2 ppm). Ketergantungan konsentrasi Mg terhadap suhu disebabkan oleh pembentukan klorit. Pada suhu yang lebih tinggi, Mg akan keluar dari larutan untuk membentuk biotit dan aktinolit. Koreksi Mg perlu diterapkan untuk fluida panasbumi yang memiliki suhu $> 180^{\circ}\text{C}$ yang mengandung Mg terlarut tinggi.

1. Jika T hasil perhitungan geotermometer $< 70^{\circ}\text{C}$, maka tidak perlu dilakukan koreksi karena fluida tidak mengalami ekuilibrium.

2. Hitung $R = [\text{Mg} / (\text{Mg} + 0,61 \text{ Ca} + 0,31 \text{ K})] \times 100$.
3. Jika $R > 50$, maka dianggap bahwa air berasal dari kesetimbangan pada suhu yang lebih rendah (T hampir sama dengan suhu terukur).
4. Jika $T > 70^\circ\text{C}$ dan $R < 50$, maka gunakan R untuk mencari $^\circ\text{T Mg}$ dari grafik koreksi Mg.
5. Menghitung suhu Na – K – Ca terkoreksi dengan menggunakan cara:

$$T^\circ \text{Na-K-Ca (koreksi Mg)} = T^\circ \text{Na-K-Ca terhitung} - T^\circ \text{Mg} \quad (14)$$



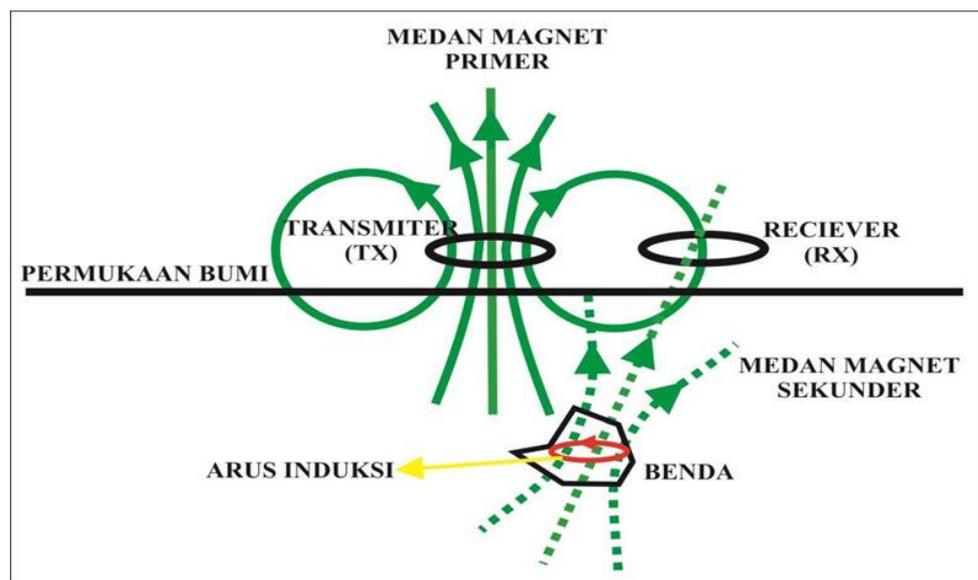
Gambar 11. Grafik penentuan suhu koreksi Mg berdasarkan hasil perhitungan geotermometer Na – K – Ca (Simmons, 1998).

3.3 Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode eksplorasi geofisika yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan elektromagnetik tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks dengan spektrum frekuensi sangat lebar ($10^{-5} \text{ Hz} - 10^4 \text{ Hz}$). 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, 2013).

Metode magnetotellurik melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi dan digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter sampai dengan puluhan kilometer. Variasi medan elektromagnetik menyebabkan terjadinya refraksi vertikal gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke dalam bumi. Variasi medan elektromagnetik alam yang merambat ke bumi kemudian mengakibatkan induksi arus listrik (*eddy current*) di bawah permukaan bumi sehingga amplitudo dan fase gelombang berubah. Arus listrik tersebut akan menghasilkan medan elektromagnetik sekunder bumi. Medan elektromagnetik sekunder ini yang membawa informasi mengenai resistivitas bawah permukaan bumi. Total medan elektromagnetik yang terukur oleh *receiver* adalah jumlah dari medan elektromagnetik primer dan sekunder.



Gambar 12. Interaksi gelombang elektromagnetik dengan medium bawah permukaan (Modifikasi Unsworth, 2009).

Bumi memiliki medan magnet yang konstan, namun yang dibutuhkan dalam metode magnetotellurik bukanlah medan magnet yang konstan, melainkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu, karena medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu dapat meng-*generate* medan listrik (Newman dkk dalam Aulia, 2014).

3.3.1. Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan persamaan yang mendeskripsikan sifat-sifat medan listrik dan medan magnet yang merupakan sintesa hasil eksperimen mengenai listrik dan magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulomb dan Maxwell (Grandis, 2013). Dalam metode magnetotellurik, persamaan Maxwell digunakan untuk mendeskripsikan sifat gelombang elektromagnetik yang digunakan. Dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot D = q \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (13)$$

Dimana E merupakan medan listrik (Volt/m), B adalah fluks atau induksi magnetik (Weber/m² atau Tesla), H adalah medan magnet (Ampere/m), j adalah rapat arus (Ampere/m), D adalah perpindahan listrik (Coulomb/m²), q adalah rapat muatan listrik (Coulomb/m³).

Persamaan (10) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (11) merupakan generalisasi dari teorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan. Persamaan (12) menyatakan

tentang hukum Gauss yaitu fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (13) merupakan hukum Gauss yang berlaku untuk medan magnetik yang dalam hal ini tidak ada monopol magnetik.

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

$$B = \mu H \quad (14)$$

$$D = \varepsilon E \quad (15)$$

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho} \quad (16)$$

Dimana μ adalah permeabilitas magnetik (Henry/m), ε adalah permitivitas listrik (Farad/m), σ adalah konduktivitas (Ohm^{-1}/m atau Siemens/m), ρ adalah tahanan jenis (Ohm.m).

Untuk menyederhanakan masalah, sifat fisik medium diasumsikan tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi (homogen isotropik). Dengan demikian akumulasi muatan seperti dinyatakan dalam persamaan (12) tidak terjadi dan persamaan Maxwell dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (18)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (19)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (20)$$

Tampak bahwa dalam persamaan Maxwell yang dinyatakan oleh persamaan di atas hanya terdapat dua variabel, yaitu medan listrik E dan medan magnet H . Dengan operasi *curl* terhadap persamaan (17) dan (18) serta mensubstitusikan besaran-besaran yang telah diketahui akan diperoleh pemisahan variabel E dan H sehingga:

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (21)$$

$$\nabla \times \nabla \times H = -\mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (22)$$

Dengan memperhatikan identitas vektor $\nabla \times \nabla \times X = \nabla \nabla \cdot X - \nabla^2 X$ dimana X adalah E atau H , serta hubungan yang dinyatakan oleh persamaan (19) dan (20), maka kita mendapatkan persamaan gelombang (persamaan Helmholtz) untuk medan listrik dan medan magnet sebagai berikut (Jones, 1983):

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (23)$$

$$\nabla^2 H = \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (24)$$

Respon medan elektromagnetik pada batuan di bawah permukaan pada kedalaman yang dalam dapat diperoleh dengan menaikkan *sounding* elektromagnetik. Prinsip ini sesuai dengan persamaan *electromagnetic skin depth* yang menggambarkan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik ketika berdifusi ke dalam suatu medium:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (25)$$

Dimana δ adalah *electromagnetic skin depth*, T adalah periode, dan ρ_a adalah *apparent resistivity*. Persamaan di atas menunjukkan bahwa *skin depth* tidak hanya bergantung pada nilai resistivitas batuan di bawah permukaan, tapi juga bergantung pada periode atau frekuensi alat yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi alat yang digunakan, maka akan semakin dangkal penetrasinya. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi alat yang digunakan maka semakin dalam pula penetrasi yang didapatkan.

Medan elektromagnet yang menginduksi Bumi secara alami dan digunakan untuk penelitian MT memiliki rentang frekuensi dari 10^{-3} hingga 10^5 Hz.

Jika diasumsikan resistivitas rata-rata batuan di kerak dan mantel Bumi adalah $100 \Omega\text{m}$, maka akan didapatkan penetrasi gelombang elektromagnetik mampu mencapai $\sim 160 \text{ m}$ hingga $> 500 \text{ km}$ (Simpson dan Bahr, 2005).

Tujuan dari pengolahan data adalah mendapatkan fungsi transfer MT yaitu tensor impedansi yang menyatakan hubungan antara medan listrik dan medan magnet dalam domain frekuensi melalui persamaan berikut (Eggers dalam Yuliansyah, 2016):

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad (26)$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \quad (27)$$

Atau

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

$$E = Z \cdot H \quad (28)$$

Atau

$$Z = \frac{E}{H} \quad (29)$$

Dalam kasus 2D hanya dibutuhkan impedansi untuk menggambarkan secara lengkap tensor yaitu:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \rightarrow Z = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Dimana

$$Z_{xx} = \frac{E_x}{H_x}; Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}; Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}; Z_{yy} = \frac{E_y}{H_y}$$

Komponen medan listrik E dan medan magnet H yang digunakan adalah yang saling tegak lurus. Sehingga, Z_{xx} dan Z_{yy} bernilai 0.

Parameter yang dianalisis adalah *apparent resistivity* dan *phase*. Persamaan *apparent resistivity* didasari oleh nilai impedansi gelombang. Dan karena terdapat dua impedansi yang digunakan yaitu Z_{xy} dan Z_{yx} maka terdapat dua nilai *apparent resistivity* juga yaitu ρ_{xy} (TE) dan ρ_{yx} (TM).

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (31)$$

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \phi_{yx} = \tan^{-1} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (32)$$

3.4 Model 3 Dimensi Magnetotellurik

Pemodelan 3 dimensi dalam metode magnetotellurik menggunakan asumsi bahwa nilai variasi resistivitas terjadi baik pada arah vertikal maupun lateral. Dalam pemodelan inversi 3 dimensi, data yang digunakan tidak memerlukan konfigurasi sesuai arah *strike* utama yang dominan. Inversi 3 dimensi magnetotellurik mengasumsikan variasi lapisan bawah permukaan dalam arah vertikal dan lateral sehingga semua komponen tensor impedansi yang digunakan memiliki nilai yang berbeda (Grandis, 2013).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli 2022 sampai dengan bulan Februari 2023 dan bertempat di Laboratorium Geofisika Eksplorasi, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

4.2 Data dan Perangkat Lunak

Adapun data dan perangkat penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data Penelitian

a. Data Geokimia

Data geokimia yang digunakan adalah data geokimia fluida. Data geokimia ini berupa data pH, Na, K, Ca, Mg, SiO₂, Cl, SO₄, dan HCO₃. Data geokimia digunakan untuk menganalisis karakteristik fluida panasbumi dan menentukan estimasi suhu reservoir panasbumi.

b. Model Magnetotellurik

Model magnetotellurik yang digunakan dalam penelitian ini berupa model 2D (2 dimensi) magnetotellurik. Model ini digunakan untuk mengidentifikasi komponen sistem panasbumi serta membuat model tentatif sistem panasbumi.

2. Perangkat Penelitian

a. Microsoft Office Excel 2010, digunakan untuk melakukan pengolahan data geokimia fluida menggunakan programliquid_analysis_v3_powell cumming_2010_stanfordgw.xls (Powell dan Cumming, 2010).

b. Surfer 12, digunakan untuk melakukan visualisasi 2D magnetotellurik.

- c. Perangkat lunak penunjang lainnya, diantaranya yaitu ArcGIS 10.3, Voxler, Global Mapper 18 yang digunakan untuk melakukan pengolahan peta dasar, digitasi peta geologi, dan informasi geografis lainnya.

4.3 Jadwal Penelitian

Adapun jadwal kegiatan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Jadwal kegiatan penelitian

Kegiatan	Bulan (Minggu ke-)																															
	November				Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengumpulan Data					■	■	■	■																								
Pengolahan Data									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Pemodelan dan Visualisasi Data									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Penyusunan Proposal Usul																																
Seminar Usul																																
Analisis dan Interpretasi Data									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
Penyusunan Laporan Hasil																	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Seminar Hasil																																
Penyelesaian Laporan Skripsi																													■	■	■	■
Ujian Komprehensif																																■

4.4 Prosedur Penelitian

Pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini terbagi dalam beberapa tahapan pengolahan data yaitu sebagai berikut:

4.4.1 Pengolahan Data Geokimia

Pengolahan data geokimia yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1 Keseimbangan Ion (*Ion Balance*)

Perhitungan keseimbangan ion (*ion balance*) dalam sampel mata air panas dilakukan untuk mengetahui kelayakan analisis geokimia pada sampel mata air panas tersebut, yaitu dengan membandingkan konsentrasi molal unsur-unsur positif dan unsur-unsur negatif. Hasil perhitungan keseimbangan ion ini juga dapat digunakan untuk mengetahui kualitas dari data geokimia yang

digunakan.

2 Geoindikator

Geoindikator Cl – SO₄ – HCO₃ digunakan untuk menentukan tipe fluida panasbumi apakah termasuk dalam tipe air klorida, air sulfat, atau air bikarbonat, sedangkan geoindikator Na – K – Mg digunakan untuk memperoleh informasi dari fluida panasbumi apakah termasuk dalam immature water atau equilibrium water. Geoindikator Na – K – Mg ini juga dapat digunakan untuk menentukan geotermometer mana yang cocok digunakan untuk melakukan estimasi suhu reservoir. Sebelum melakukan plot, terlebih dahulu dilakukan perhitungan konsentrasi dari setiap unsur. Plot geoindikator dilakukan menggunakan programliquid_analysis_v3_powell-cumming_2010_stanfordgw.xls (Powell dan Cumming, 2010).

3 Geotermometer

Pada penelitian ini, geotermometer digunakan untuk menentukan estimasi dari temperatur reservoir panasbumi. Perhitungan geotermometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah geotermometer silika dan Na – K. Berdasarkan beberapa geotermometer yang digunakan ini, akan dipilih geotermometer yang dianggap sesuai dengan karakteristik fluida panasbumi untuk menentukan estimasi temperatur reservoir.

4 Visualisasi Model 2D Magnetotellurik

Data magnetotellurik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan model 2D berupa gambar. Prosedur penelitian pada data ini dilakukan dengan melakukan digitasi model sehingga dapat diperoleh nilai resistivitas sehingga bisa digunakan untuk melakukan visualisasi 2D. Pertama, dilakukan export model gambar menjadi format spasial dan dilakukan digitasi pada 3 lintasan data menggunakan Surfer 12. Setelah diperoleh data hasil digitasi, dilakukan pemodelan visualisasi 3D menggunakan Voxler

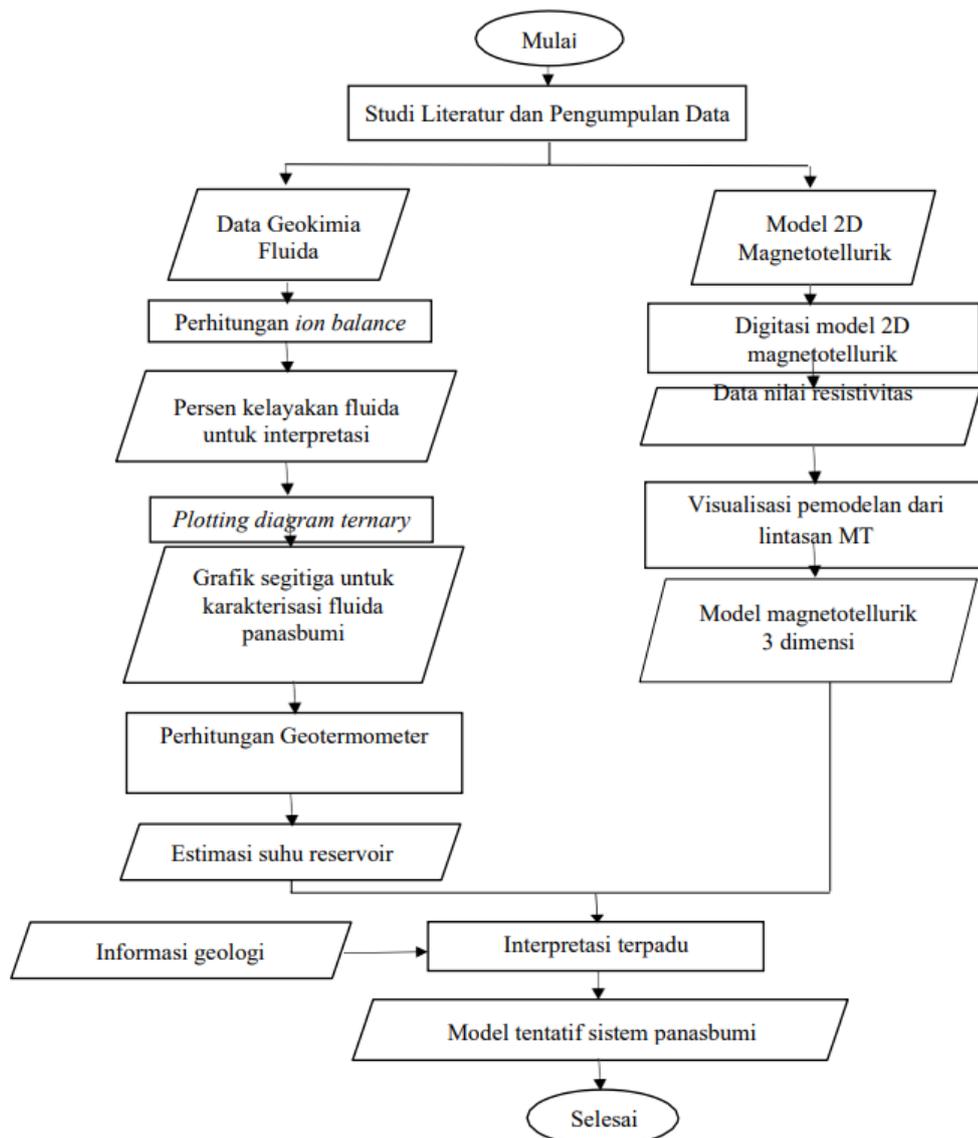
5 Pembuatan Model Tentatif Sistem Panasbumi

Model tentatif sistem panasbumi dibuat setelah memperoleh hasil analisis data geokimia dan model visualisasi 3D magnetotellurik. Pada tahap ini, hasil analisis data geokimia dan model magnetotellurik dikorelasikan dan

diinterpretasi secara terpadu untuk membuat model konseptual sistem panasbumi yang sesuai berdasarkan data.

4.5 Diagram Alir

Diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 13 berikut:



Gambar 13. Diagram alir penelitian

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Sampel fluida panasbumi yang digunakan memiliki kesetimbangan yang baik dan merupakan manifestasi *outflow* yang berada di sebelah utara dan selatan Gunung Tangkuban Perahu.
2. Tipe fluida panasbumi pada manifestasi Maribaya, Batukapur, Ciracas, dan Sebagian besar manifestasi Batugede didominasi oleh tipe fluida bikarbonat yang mengandung konsentrasi HCO_3 yang tinggi karena berada pada zona *outflow* dan saat naik ke permukaan telah mengalami pengenceran oleh air meteorik (air permukaan).
3. Tipe fluida panasbumi pada manifestasi, Kancha dan Domas di dominasi oleh tipe fluida sulfat dengan konsentrasi SO_4 yang lebih tinggi. Pada manifestasi Ciater dan salah satu titik manifestasi Batugede 3 dominan kandungan Cl yang didefinisikan sebagai tipe fluida klorida/klorin.
4. Pada manifestasi sebelah utara diperoleh estimasi suhu reservoir panasbumi berkisar antara $140^\circ\text{C} - 185^\circ\text{C}$, sedangkan pada daerah selatan estimasi suhu reservoir nya berkisar antara
5. Daerah penelitian menunjukkan bahwa pada titik sebaran manifestasi kompleks memiliki perlapisan bawah permukaan berupa *claycap / caprock* dengan ketebalan 500m-1500 m pada bagian utara dan semakin dalam di bagian utara dengan ketebalan 1000-2000m pada elevasi 300 sampai -1800 mdpl, zona reservoir berada pada elevasi 1500 – 3000 m, di bagian utara lapisan reservoir semakin dalam dengan kedalaman sekitar 2500 – 3000 m dengan nilai resistivitas 15.2 – 80 Ohm.m, lapisan *heat source* berada di bawah lapisan reservoir, serta terdapat zona *recharge* di sebelah barat manifestasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aribowo, Y. 2011. Prediksi Temperatur Reservoir Panasbumi dengan Menggunakan Metoda Geotermometer Kimia Fluida. *Jurnal Teknik* Vol. 32 No.3, 234-238.
- Aulia, M. Z. 2014. Karakterisasi Sistem Panasbumi 'TP' dengan Analisis Data Geokimia dan Model Magnetotellurik untuk Menentukan Lokasi Titik Bor Eksplorasi (Skripsi). Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Budiardi, M., Budiardjo, B., dan Nugroho. 1997. Resource Characteristics of The Ungaran Field, Central Java, Indonesia. *Proceeding of National Berkala MIPA, Seminar of Human Resource Indonesian*. Yogyakarta.
- Dickson, M. H., dan Fanelli, M. 2004. *What is Geothermal energy*. Italy: Institute Geoscience Pisa.
- Eggers, D. E. 1953. An Eigenstate Formulation of The Magnetotelluric Impedance Tensor. *Geophysics* 47, 53-68.
- Goff, F., dan Janik, C. J. 2000. Geothermal System. In H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 817-834). United States: Academic Press.
- Grandis, H. 2013. *Pengantar Metode Magnetotellurik (MT)*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Haerudin N, Raflesia F, Rustadi. 2017. Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro dan Poisson's Ratio Di Lapangan Panas bumi Desert Peak Sebelum dan Sesudah Stimulasi Enhanced Geothermal System (EGS). *Jurnal Geofisika Eksplorasi* Vol. 3/No. 2
- Hendri, R., Prabowo, S. B., dan Perdana, M. 2012. Korelasi Intensitas Pola Kelurusan Tangkuban Perahu Terhadap Keberadaan Manifestasi Dipermukaan. *Proceedings 12th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference*. Bandung.

- Herdianita, N. R., dan Priadi, B. 2008. The Chemical Compositions of Thermal Waters at Ciarinem and Cilayu, Pameungpeuk, West Java-Indonesia. *ITB Journal Science* Vol. 39A No. 1, 49-61.
- Hochstein, M. P., dan Browne, P. R. 2000. Surface Manifestation of Geothermal System with Volcanic Heat Source. In H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 835-855). The University of Auckland: Academy Press.
- Hochstein, M. P., dan Soengkono, S. 1997. *Geothermal Exploration for Earth Scientists*. New Zealand: Geothermal Institute University of Auckland.
- Hutapea, F. 2010. Eksplorasi Panas Bumi dengan Metode Geofisika dan Geokimia pada Daerah Bonjol, Kabupaten Pasaman-Sumatera Barat. (Skripsi). Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Jones, A. G. 1983. On The Equivalence of The Nobblet and Bostick Transformation in The Magnetotellurics Methode. *Journal of Geophysics* 53, 72-73.
- Juhri, S., dan Harijoko, A. 2016. Karakteristik Geokimia Air Panasbumi di Sekitar Gunung Slamet. *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan Ke-9* (pp. 389-400). Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Karyanto. 2003. Pencitraan Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Way Ratai Lampung dengan Metode Tahanan Jenis 2 Dimensi. *Jurnal Sains Tek.* Vol. 9 No. 3, 55-59.
- KESDM, D. P. 2017. *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Panas Bumi.
- Nasution, A., Kartadinata, M. N., Kobayashi, T., Siregar, D., Sutaningsih, E., Hadisantono, R., dan Kadarstia, E. 2004. Geology, Age Dating and Geochemistry of The Tangkuban Perahu Geothermal Area, West Java, Indonesia. *Jurnal Geothermal Research Society of Japan* Vol. 6 No. 3, 285-303.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques*. United Kingdom: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Ningsih, C. 2018. Estimasi Cadangan Reservoir Sistem Panasbumi Hidrotermal Non-vulkanik Berdasarkan Data 3G (Geologi, Geokimia, Geofisika) dan Landaian Suhu Pada Lapangan Panasbumi Silver Peak, Esmeralda Country, Nevada, U.S.A. (Skripsi). Bandar Lampung: Universitas Lampung.

- Powell, T., dan Cumming, W. 2010. Spreadsheets For Geothermal Water And Gas Geochemistry. *Proceedings Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California: Stanford University.
- Saptadji, N. M. 2009. *Karakterisasi Reservoir Panasbumi*. Bandung: Geothermal ITB.
- Saputra, M. P., dan Suryantini. 2015. A Correlation Study between Volcanic Activities and Thermal Water Changes in Tangkuban Perahu Hydrothermal Prospect, Jawa Barat, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia.
- Silitonga, P. H. 1973. *Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Simmons, S. F. 1998. *Geochemistry Lecture Notes*. New Zealand: Geothermal Institute University of Auckland.
- Simpson, F., dan Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Suharno. 2010. *Pengembangan Prospek Panas Bumi*. Bandar Lampung: Fakultas Teknik Universitas Lampung.
- Suharno. 2012. *Sistem Panas Bumi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Suharno. 2013. *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Unsworth, M. 2009. Introduction to Electromagnetic exploration methods. In *Geophysics* (p. 223). Canada: University of Alberta.
- Utami, Z. D., dan Ardian, P. 2018. Penentuan Karakteristik Fluida dan Estimasi Temperatur Reservoir Panasbumi di Sekitar Gunung Talang. *Jurnal Fisika Unand* Vol. 7, No. 2, 130-137.
- Yuliansyah, D. 2016. Identifikasi Zona Reservoar Lapangan Panas Bumi Guci Jawa Tengah dengan Menggunakan Data Geokimia dan Metode Magnetotellurik (Skripsi). Bandar Lampung: Universitas Lampung.