

SKRIPSI

**IDENTIFIKASI EVOLUSI FLUIDA PANAS BUMI BERDASARKAN
COMPOSITE LOG DAN PRESSURE-TEMPERATURE SURVEY SUMUR
LHD-A DAN LHD-B LAPANGAN PANAS BUMI PT. PERTAMINA
GEOTHERMAL ENERGY AREA LAHENDONG,
KOTA TOMOHON, PROVINSI SULAWESI UTARA**

Disusun dan Diajukan Oleh

LUSIUS EVODIUS ANGGI TONAPA

D061 18 1503



**DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR
2023**

SKRIPSI

**IDENTIFIKASI EVOLUSI FLUIDA PANAS BUMI BERDASARKAN
COMPOSITE LOG DAN PRESSURE-TEMPERATURE SURVEY
SUMUR LHD-A DAN LHD-B LAPANGAN PANAS BUMI PT.
PERTAMINA GEOTHERMAL ENERGY AREA LAHENDONG,
KOTA TOMOHON, PROVINSI SULAWESI UTARA**

Disusun dan Diajukan Oleh

LUSIUS EVODIUS ANGGI TONAPA

D061 18 1503

*Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana strata satu
(S-1) pada Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin*

**DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

IDENTIFIKASI EVOLUSI FLUIDA PANAS BUMI BERDASARKAN COMPOSITE LOG DAN PRESSURE TEMPERATURE SURVEY SUMUR LHD-A DAN LHD-B LAPANGAN PANAS BUMI PT. PERTAMINA GEOTHERMAL ENERGY AREA LAHENDONG, KOTA TOMOHON PROVINSI SULAWESI UTARA

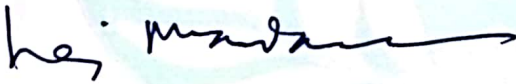
Disusun dan diajukan oleh :

LUSIUS EVODIUS ANGGI TONAPA
D061 18 1503

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi
Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 16 Agustus
2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



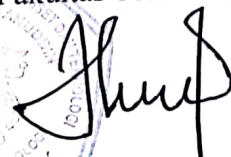
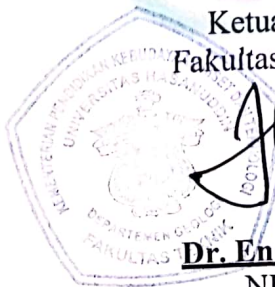
Prof. Dr. Eng. Adi Maulana, S.T., M. Phill
NIP. 19800428 200501 1 001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T., IPM
NIP. 19650928 200003 1 002

Ketua Departemen Teknik Geologi
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng
NIP. 19771214 200501 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Lusius Evodius Anggi Tonapa

NIM : D061181503

Program Studi : Teknik Geologi

Jenjang : S1

Menyatakan bahwa karya tulis saya yang berjudul :

**“IDENTIFIKASI EVOLUSI FLUIDA SISTEM PANAS BUMI
BERDASARKAN COMPOSITE LOG DAN PRESSURE-
TEMPERATURE SURVEY SUMUR LHD-A DAN LHD-B LAPANGAN
PANAS BUMI PT. PERTAMINA GEOTHERMAL ENERGY AREA
LAHENDONG, KOTA TOMOHON, PROVINSI SULAWESI UTARA”**

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain, bahwa skripsi ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila ditemukan terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 21 Agustus 2023

Yang menyatakan



Lusius E Anggi Tonapa

D061 18 1503

SARI

Daerah penelitian masuk kedalam Wilayah Kerja Panas bumi Lahendong, tepatnya pada koordinat 124°49'30" BT dan 1°15'18"N LS yang merupakan salah satu WKP produktif di Indonesia yang telah berproduksi selama lebih dari 20 tahun dengan kapasitas produksi 120 MW yang berasal dari 6 unit pembangkit. Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi zona alterasi pada *feed zone* daerah penelitian, mengidentifikasi kedalaman pada sistem panas bumi daerah penelitian, mengidentifikasi perubahan sistem panas bumi daerah penelitian. Lapangan panasbumi lahendong merupakan lapangan panasbumi yang telah beroperasi lama dan selama proses produksi panas bumi pada lapangan ini, tentunya akan terjadi perubahan karakteristik kedalaman reservoir yang dapat mempengaruhi kualitas maupun kuantitas panas bumi pada lapangan ini. Analisis tingkat alterasi dan *pressure-temperature* perlu dilakukan pada lapangan panas yang tengah beroperasi untuk dapat mengetahui dan melakukan monitoring terhadap kondisi reservoir agar proses produksi dapat maksimal dilakukan. Zona mineralisasi pada daerah ini adalah Zona Smektit, Zona Klorit-Ilit, Zona Epidot-Anhidrit, Zona Epidot-Serisit, dan Zona Aktinolit-Epidot dengan zona alterasi Zona *Intermediate Argillic*, Zona *Advance Argillic*, Zona *Phylitic*, Zona *Outer Propilitic*, Zona *Inner Propilitic*. Identifikasi kedalaman *feed zone* berdasarkan data serbuk bor (*Cutting*) yang didukung dengan XRD (*X-Ray Diffraction*), diindikasikan pada kedalaman 1010 mTVD pada sumur LHD-A, dan pada kedalaman 1100 mTVD pada sumur LHD-B. Sedangkan berdasarkan identifikasi PTS (*Pressure-Temperature Survey*) *feed zone* diidentifikasi pada kedalaman 1036 mTVD pada sumur LHD-A, dan 1103 mTVD pada sumur LHD-B. Keterdapatannya mineral lempung berupa smektit grup yang diindikasikan menjadi lapisan *clay cap* pada sistem panas bumi sebagaimana yang ditemukan pada kedalaman 1010 mTVD keatas permukaan pada sumur LHD-A dan pada kedalaman 1100 mTVD pada sumur LHD-B. Sedangkan identifikasi zona reservoir yang diidentifikasi berdasarkan kemunculan mineral epidot, serisit dan adularia yang ditemukan pada kedalaman 1100 mTVD pada sumur LHD-A, dan kedalaman 1010 mTVD pada LHD-B. Berdasarkan identifikasi PTS (*Pressure-Temperature Survey*) diidentifikasi pula adanya indikasi reservoir dangkal pada kedalaman 450 mTVD sampai 700 mTVD yang diakibatkan oleh *water influx* yang kemungkinan diakibatkan adanya air yang masuk dari akuifer pada kedalaman tersebut. Sedangkan pada kedalaman lebih dari 2000 mTVD diindikasikan adanya anomali berupa *Convective flow* Identifikasi penurunan reservoir pada sumur LHD-A yang awalnya pada kedalaman 820 mTVD, mengalami penurunan 280 m hingga pada kedalaman 1100 mTVD. Sedangkan pada sumur LHD-B yang awalnya pada kedalaman 750 mTVD, mengalami penurunan 550 m hingga pada kedalaman 1300 mTVD.

Kata kunci: Lahendong, panas bumi, pressure, temperature, alterasi, composite log.

ABSTRACT

The research area is included in the Lahendong Geothermal Working Area, precisely at coordinates 124°49'30" E and 1°15'18"N LS which is one of the productive WKPs in Indonesia which has been in production for more than 20 years with a production capacity of 120 MW originating from 6 generator unit. The purpose of this research is to identify the alteration zone in the feed zone of the study area, identify the depth of the geothermal system in the study area, identify changes in the geothermal system in the research area. The Lahendong geothermal field is a geothermal field that has been operating for a long time and during the geothermal production process in this field, of course there will be changes in the characteristics of the depth of the reservoir which can affect the quality and quantity of geothermal energy in this field. Analysis of the rate of change and pressure-temperature needs to be carried out in an operating hot field to be able to identify and monitor reservoir conditions so that the production process can be carried out optimally. The mineralized zones in this area are the Smectite Zone, the Chlorite-Ilite Zone, the Epidote-Anhydrite Zone, the Epidote-Sericite Zone, and the Actinolite-Epidote Zone with alteration zones Intermediate Argillic Zone, Advance Argillic Zone, Phylitic Zone, Outer Propilitic Zone, Inner Propilitic Zone . Identification of feed zone depth based on cutting data supported by XRD (X-Ray Diffraction), indicated at a depth of 1010 mTVD in the LHD-A well, and at a depth of 1100 mTVD in the LHD-B well. Meanwhile, based on the availability of the PTS (Pressure-Temperature Survey) feed zone, it was identified at a depth of 1036 mTVD in the LHD-A well, and 1103 mTVD in the LHD-B well. The presence of mineral clay in the form of smectite groups is indicated to be a clay cap layer in geothermal systems as found at a depth of 1010 mTVD uphill in the LHD-A well and at a depth of 1100 mTVD in the LHD-B well. Meanwhile, the existence of a reservoir zone was identified based on the occurrence of epidote, sericite and adularia minerals which were found at a depth of 1100 mTVD in the LHD-A well, and a depth of 1010 mTVD in LHD-B. Based on PTS (Pressure-Temperature Survey) findings, it was also identified that there were indications of shallow reservoirs at depths of 450 mTVD to 700 mTVD caused by water inflow which was possibly caused by water entering from the aquifer at that depth. Whereas at depths of more than 2000 mTVD an anomaly in the form of convective flow was indicated. Identification of reservoir decline in the LHD-A well, which was initially at a depth of 820 mTVD, has decreased by 280 m to a depth of 1100 mTVD. Whereas in the LHD-B well which was initially at a depth of 750 mTVD, it has decreased by 550 m to a depth of 1300 mTVD..

Key Word: Lahendong, geothermal, pressure, temperature, alteration, composite log.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat kasih dan karunia-Nya, skripsi dengan judul “**Identifikasi Sistem Panas Bumi Berdasarkan Composite Log dan Pressure-Temperature Survey Sumur LHD-A dan LHD-B Lapangan Panas Bumi PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong, Kota Tomohon, Provinsi Sulawesi Utara**” dapat berjalan lancar dan selesai dengan bantuan-Nya.

Selama penyusunan tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak **Prof. Dr. Eng., Ir., Adi Maulana, S.T., M.Phil.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak **Prof. Dr. Adi Tonggihroh, S.T., M.T., IPM.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu dan bimbingan kepada penulis.
3. Bapak **Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng.** selaku kepala Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin.
4. **Bapak dan Ibu Dosen** Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin
5. **Bapak dan Ibu Staf** Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin

6. Bapak **Benedict Amandus Hananto**, selaku pembimbing penelitian pada PT.Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong atas dedikasi, saran, dan bimbingan selama penelitian.
7. Bapak **Suryadi**, Assistant Manager Operation PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong yang telah memberikan bantuan untuk dapat melakukan Magang dan memberikan bimbingan serta motivasi kepada penulis selama masa Kerja Praktek.
8. Ibu **Anjani Puspadianti** PT.Pertamina Geothermal Energy Area Karaha yang juga telah membimbing selama penelitian ini.
9. Bapak dan ibu pekerja PT. Pertamina Area Lahendong Area Lahendong pada fungsi Operation, **Bapak Achmad Maulana, Bapak Achmad Sofyan, Bapak Burhan, Bapak Hafidz, Bapak Ferry, Bapak Ayomi, Bapak Taufan, Ibu Dessy, Ibu Vina dan Kak Eva** yang telah membimbing penulis selama masa Magang
10. Tim Pengamatan Manifestasi PT. Pertamina Geothermal Energy **Bapak Ristio Efendy, Kak Amel, Kak Rishang, Kak Naufal, Kak Monic, dan Kak Tajul Arifin** atas ilmu dan pengalamannya.
11. Teman-teman **Teknik Geologi 2018 Xenolith** atas dukungan serta inspirasi yang luar biasa bagi penulis.
12. Teman-teman Intern PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong yang telah menemani penulis pada masa Magang
13. Seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Dalam penyusunan laporan ini, penulis sadar bahwa masih banyak terdapat kesalahan serta kekeliruan didalamnya. Maka penulis sangat mengharapkan kritik, saran dan masukan yang membangun terhadap laporan ini. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun bagi semua pihak yang berkepentingan lainnya

Makassar, 15 Maret 2023

Penulis

DAFTAR ISI

SARI.....	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Maksud dan Tujuan	3
1.5 Letak dan Kesampaian Daerah.....	3
1.6 Peneliti Terdahulu.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Geologi Regional.....	6
2.1.1 Geomorfologi Regional	6
2.1.2 Stratigrafi Regional.....	7
2.1.3 Struktur dan Tektonik Regional	7
2.2 Geologi Daerah Penelitian	10
2.2.1 Geomorfologi Daerah Penelitian	11
2.2.2 Stratigrafi Daerah Penelitian.....	13
2.2.3 Struktur Daerah Penelitian.....	17
2.3 Sistem Panas Bumi.....	19
2.3.1 Komponen Penyusun Sistem Panas Bumi	19
2.4 Alterasi Hidrothermal.....	26
2.5 Tekanan dan Suhu.....	31
2.6 Identifikasi Sistem Panas Bumi.....	33
BAB III METODE DAN TAHAPAN PENELITIAN.....	41

3.1	Metode Penelitian.....	41
3.2	Tahapan Penelitian.....	41
3.2.1	Tahapan Persiapan	41
3.2.2	Tahapan Studi Pustaka	42
3.2.3	Tahapan Pengumpulan Data	42
3.2.4	Tahapan Analisis Data.....	42
3.2.5	Tahapan Penyusunan Laporan	45
3.2.6	Diagram Alir	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		47
4.1	Litologi Bawah Permukaan Daerah Penelitian.....	47
4.1.1.	Andesit Basaltis Teralterasi.....	47
4.1.2	Tufa Lapili Teralterasi.....	48
4.1.3	Breksi Vulkanik Teralterasi.....	49
4.1.4	Andesit Teralterasi	51
4.1.5	Tufa Teralterasi	52
4.2	Zona Mineralisasi Daerah Penelitian.....	53
4.2.2	Zona Smektit.....	53
4.2.3	Zona Klorit-Ilit.....	54
4.2.4	Zona Epidot-Anhidrit.....	55
4.2.5	Zona Epidot-Serisit	56
4.2.6	Zona Aktinolit-Epidot.....	57
4.3	Zona Alterasi Daerah Penelitian.....	57
4.3.2	Sumur LHD-A	58
4.3.3	Sumur LHD-B.....	63
4.4	Kondisi Sumur.....	68
4.4.1	Sumur LHD-A	68
4.4.2	Sumur LHD-B.....	70
4.5	Kurva Suhu dan Tekanan.....	72
4.5.1	Sumur LHD-A	73
4.5.2	Sumur LHD-B.....	75
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		77

5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79

LAMPIRAN :

1. Penampang bawah permukaan LHD-A dan LHD-B sebelum produksi.
2. Penampang bawah permukaan LHD-A dan LHD-B setelah produksi.
3. Composite Log dan mineralisasi LHD-A dan LHD-B.
4. Tabel Pressure-Temperature-Spinner Survey LHD-A dan LHD-B.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Peta tunjuk lokasi penelitian	4
Gambar 2.1. Struktur regional Sulawesi bagian utara menurut Lecuyer, (1997).	8
Gambar 2.2. North Sulawesi Trench yang menunjam bagian utara Pulau Sulawesi dan West Sangihe Trench-Cotabato Trench yang menunjam Pulau Mindanao (Hamilton, 1979).	9
Gambar 2.3. Penunjaman Sangihe Trench Bagian Timur dan Halmahera Island Arc (Hamilton, 1979).....	10
Gambar 2.4. Peta geologi daerah Lahendong (Utami,2011).....	11
Gambar 2.5 Kenampakan geomorfologi perbukitan bergelombang yang digunakan sebagai lokasi sumur produksi, difoto dari daerah Leilem ke arah N140°E.....	12
Gambar 2.6. Kenampakan geomorfologi pedataran yang digunakan sebagai persawahan, difoto pada daerah Remboken difoto dari arah N321°E.....	13
Gambar 2.7. Stratigrafi daerah penelitian (Utami,2011).....	17
Gambar 2.8. Peta geologi lapangan panasbumi Lahendong yang memperlihatkan persebaran struktur pada daerah penelitian (Siahaan,2005)	18
Gambar 2.9. Sistem Panas Bumi Volcanogenic (Goff & Janik,2000)	21
Gambar 2.10. Sistem Panas Bumi <i>Non-volcanogenic</i> (Richards and Blackwell, 2002)	22
Gambar 2.11. Ilustrasi pengisian rongga dan suhu serta tekanan sistem panas bumi dominasi uap (kiri) dan dominasi air (kanan) (Saptadji, 2004).	24
Gambar 2.12. Klasifikasi grup mineral alterasi berdasarkan zona alterasi dan suhu terbentuknya (Reyes,1990).....	27
Gambar 2.13. Alterasi mineral sistem hidrothermal berdasarkan pH dan suhu (Corbett & Leach,1998).....	28

Gambar 2.14. Proses pengukuran data <i>Pressure-Temperature-Spinner Survey</i> (PTS) daerah penelitian.	32
Gambar 2.15. Model konseptual sistem panasbumi lapangan Awibengkok (Saptadji, 2004).....	33
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	46
Gambar 4.1. Mineral alterasi dan suhu pembentukan zona mineralisasi smektit menurut (Reyes,1990).....	54
Gambar 4.2. Mineral alterasi dan suhu pembentukan zona mineralisasi klorit-ilit menurut (Reyes,1990).....	55
Gambar 4.3. Mineral Alterasi dan Suhu pada zona mineralisasi epidot-anhidrit menurut (Reyes,1990).....	56
Gambar 4.4. Mineral alterasi dan suhu zona mineralisasi epidot-serisit menurut (Reyes,1990).....	57
Gambar 4.5. Mineral alterasi dan suhu zona mineralisasi aktinolit-epidot menurut (Reyes,1990).....	57
Gambar 4.6. Sampel <i>Cutting Zona Intermediate Argillic</i> Sumur LHD-A. Ilt=Illit, Pyr=Pirit, IOxd=Iron Oksida, Ser=Serisit, Chl=Klorit, Pyr=Pirit.	59
Gambar 4.7. Sampel <i>Cutting Zona Advance Argillic</i> Sumur LHD-A. Mnt=Montmorilonit, Hmt=Hematit, Ilt=Illit, IOxd=Iron Oksida, Pyr=Pirit, Chl=Klorit.	60
Gambar 4.8. Sampel <i>Cutting Zona Phyllic</i> Sumur LHD-A. Ser=Serisit, Cct=Kalsit, Epd=Epidot, SeQ=Kuarsa Sekunder Hmt=Hematit, Ilt=Illit, IOxd=Iron Oksida, Pyr=Pirit, Chl=Klorit.	61
Gambar 4.9. Sample <i>Cutting Zona Outer Propylitic</i> sumur LHD-A. SeQ =Kuarsa Sekunder, Chl = Klorit, Kfld = K-Feldspar, Pyr = Pirit, Mgt = Magnetit, SecB = Biotit Sekunder, Ilt = Illit, Epd = Epidot).	62
Gambar 4.10 Sampel <i>Cutting Pada Zona Inner Propylitic</i> sumur LHD-A (SeQ = Kuarsa Sekunder, Cct = Kalsit, Chl = Klorit, Hmt = Hematit, Ilt = Illit, Epd = Epidot, Pyr = Pirit, Akt = Aktinolit, Kfld= K-Feldspar).	63

Gambar 4.11. Sampel <i>Cutting</i> Pada Zona Intermediate Argillic Alteration sumur LHD-B. Chl = Klorit, Ser = Serisit, Ilt = Illit, Mnt = Montmorilonit, Pyr = Pirit, IOxd = Iron Oxide.	64
Gambar 4.12. Sampel <i>Cutting</i> Pada Zona Advance Argillic Alteration sumur LHD-B. Chl = Klorit, Hmt = Hematit, Ilt = Illit, Mnt = Montmorilonit, Pyr = Pirit, IOxd = Iron Oxide, SeQ = Kuarsa Sekunder, Trm = Tridimit, Kst = Kristobalit.....	65
Gambar 4.13. Sampel <i>Cutting</i> Pada Zona Phyllic Alteration sumur LHD-B. Hmt = Hematit, Ilt = Illit, Adl = Adularia =, Epd = Epidot, Ser = Serisit, Cct = Kalsit.	66
Gambar 4.14. Sampel <i>Cutting</i> Pada Zona Outer Propylitic Alteration sumur LHD-B. Hmt = Hematit, Ilt = Illit, Adl = Adularia =, Epd = Epidot, Ser = Serisit, Zeo = Zeolit, Cct = Kalsit, Wkt = Wairakit.	67
Gambar 4.15. Mineral Alterasi Zona Inner Propylitic sumur LHD-B. Hmt = Hematit, Ilt = Illit, Anh = Anhidrit, Epd = Epidote, Ser = Serisit, Pyr = Pirit, Cct = Kalsit, Akt = Aktinolit.	68
Gambar 4.16. Kurva Suhu dan Tekanan (Pressure-Temperature) Sumur LHD-A.	74
Gambar 4.17. Kurva Suhu dan Tekanan (Pressure Temperature) Sumur LHD-B.	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Pembagian suhu sistem Panas Bumi menurut Hochstein (1990)..... 24

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi adalah energi yang berasal dari panas alami dari bumi. Kerak atas memiliki gradien kedalaman suhu 20°C - $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (White,1965). Sistem panas bumi yang lengkap disusun dari tiga komponen utama, yaitu batuan reservoir yang permeabel, adanya air yang membawa panas dari reservoir ke permukaan, dan sumber panas (Goff & Janik,2000).

Lapangan panas bumi Lahendong, Provinsi Sulawesi Utara menjadi salah satu lapangan panas bumi yang memiliki potensi dalam pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia. Lapangan panas bumi lahendong telah menghasilkan produksi listrik sebesar 80 MW yang dipasok dari empat unit pembangkit listrik tenaga panas bumi yang masing-masing 20 MW. Sejatinya potensi panas bumi lapangan lahendong masih perlu peningkatan pemanfaatan di masa depan guna meningkatkan kapasitas produksi untuk memenuhi kebutuhan listrik Sulawesi Utara dan sekitarnya.

Dalam eksplorasi suatu lapangan panas bumi, membutuhkan analisis dari tiga disiplin ilmu yakni geologi, geofisika, dan geokimia. Perpaduan analisis dari ketiganya memungkinkan diperoleh data eksplorasi rinci berupa gambaran kondisi bawah permukaan suatu lapangan panas bumi. Pemboran lapangan panas bumi menghasilkan data *composite log*, data geokimia, data *pressure-temperature*.

Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan perlakuan atau rekayasa yang akan dilakukan pada tahap eksploitasi atau produksi.

Seiring dengan beroperasinya pemanfaatan energi panas bumi, maka dapat diidentifikasi adanya perubahan dalam tatanan sistem panas buminya. Berdasarkan hal tersebut, maka penulis melakukan penelitian skripsi mengenai **“Identifikasi Perubahan Sistem Panas Bumi Berdasarkan Composite Log dan Pressure-Temperature Survey PT.Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong, Kota Tomohon, Provinsi Sulawesi Utara”**.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari diadakannya penelitian ini ialah :

1. Bagaimana kondisi sistem panas bumi pada daerah penelitian.
2. Bagaimana perubahan sistem panas bumi pada daerah penelitian.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi pada analisis *Composite Log* yang didukung dengan data *X-Ray Diffraction*, *Cutting*, dan analisis *Pressure-Temperature-Spinner Survey*. Analisis *Composite Log* berupa identifikasi dari keterdapatan mineraliasi, tingkat alterasi, dan litologi tiap kedalaman dari sumur panas bumi, yang didukung dengan analisis dari identifikasi mineral lempung menggunakan *X-Ray Diffraction* dan *Cutting*. Analisis *Pressure-Temperature-Spinner Survey* berupa identifikasi sistem panas bumi dengan menginterpretasi

anomali suhu dan tekanan bawah permukaan suatu sumur panas bumi LHD-A dan LHD-B.

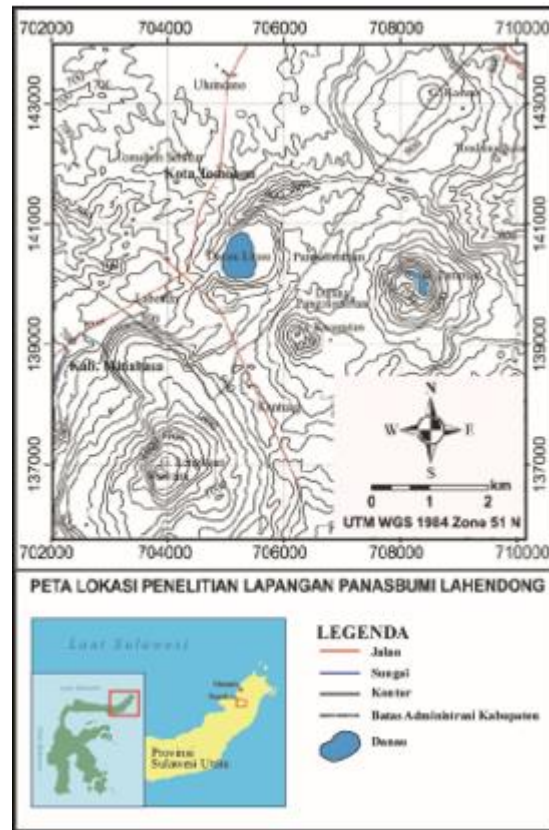
1.4 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengamati kondisi karakteristik sistem panas bumi daerah Lahendong, Kecamatan Tomohon Selatan, Kota Tomohon, Provinsi Sulawesi Utara. Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi zona alterasi pada daerah penelitian.
2. Mengidentifikasi kedalaman pada sistem panas bumi daerah penelitian.
3. Mengidentifikasi perubahan sistem panas bumi daerah penelitian.

1.5 Letak dan Kesampaian Daerah

Daerah penelitian masuk ke dalam Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Lahendong sesuai SK Menteri ESDM No. 2067K/MEM/2012 tanggal 12 Juni 2012 yang mempunyai luas area 106,600 Ha. WKP Lahendong dikelola oleh PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong yang terletak di Daerah Lahendong, Kecamatan Tomohon Selatan, Kota Tomohon, Provinsi Sulawesi Utara yang terletak pada koordinat $124^{\circ}49'30''$ dan $1^{\circ}15'18''$ (Gambar 1.1). Perjalanan dari kota Manado dapat ditempuh dengan menggunakan kendaraan beroda dua maupun beroda empat sekitar 1 jam 30 menit menuju Lahendong dengan jarak sekitar 34 km ke arah selatan.



Gambar 1. 1. Peta tunjuk lokasi penelitian

1.6 Peneliti Terdahulu

Penelitian sebelumnya juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti pada daerah penelitian, baik mengenai kondisi geologi maupun mengenai panas bumi daerah penelitian. Beberapa penelitian tersebut meliputi :

1. **Ganda dan Sunaryo (1982)**, melakukan penelitian pendahuluan tentang geologi di daerah Minahasa, Sulawesi Utara.
2. **Kartijoso Soemodioero (1982)**, melakukan *borehole* geologi di area temperatur tinggi Lahendong, Sulawesi Utara.
3. **Effendi, A.C. dan Bawono, S.S. (1997)**, melakukan penelitian berupa pemetaan Geologi Lembar Manado, Provinsi Sulawesi Utara skala 1:

250.000 yang menghasilkan hasil penelitian berupa geologi regional lembar Manado yang mencakup geomorfologi, stratigrafi serta struktur regional dan juga potensi sumber daya mineral dan energi pada daerah Sulawesi Utara.

4. **Siahaan, E.E., Soemarinda, S., Fauzi, A., Silitonga, T., Azimudin, T. dan Raharjo, I.B. (2005)**, melakukan penelitian proses tektonik dan vulkanik yang terjadi pada daerah Minahasa. Studi ini dapat dijadikan referensi mengenai sistem panas bumi daerah Lahendong.
5. **Harry Koestono (2010)**, melakukan penelitian mengenai alterasi serta model sistem panas bumi lapangan panas bumi Lahendong.
6. **Pri Utami (2011)**, melakukan studi mengenai alterasi hidrotermal dan evolusi lapangan panas bumi pada daerah Lahendong.
7. **Julian Ambassador Shiddiq (2014)**, meneliti mengenai proses pembentukan air asam pada danau vulkanik di atas kawah aktif dan air asam di reservoir panas bumi.
8. **Maren Brehme (2015)**, meneliti tentang kontrol struktur geologi pada aliran fluida sistem panas bumi di lapangan Lahendong

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Tinjauan geologi regional yang meliputi geomorfologi, stratigrafi, struktur, dan tektonik yang mencakup daerah penelitian didasarkan pada Peta Geologi Regional Manado, Sulawesi Utara (Effendi & Bawono,1997).

2.1.1 Geomorfologi Regional

Kondisi geomorfologi daerah pada lembar Manado memperlihatkan bentuk ketidakaturan permukaan bumi berupa perbukitan datar, perbukitan miring, hingga pegunungan. Kondisi relief perbukitan hingga pegunungan tersyat tajam membentang dari bagian barat daya hingga timur laut. Daerah pegunungan terdapat pada daerah bagian barat daya mencakup Gunung Ususing dan Gunung Lumedon dengan ketinggian rata-rata 1450 Mdpl. Kenampakan relief pegunungan juga tersebar pada wilayah sekitar Gunungapi Soputan dengan ketinggian 1830 Mdpl dan Gunungapi Lokon dengan ketinggian 1579 Mdpl. Sedangkan untuk relief perbukitan tersebar dari bagian barat daya hingga selatan regional Lembar Manado (Effendi & Bawono,1997).

Morfologi yang ditunjukkan pada satuan perbukitan miring memperlihatkan undak-undak perbukitan yang memanjang yang menunjukkan daerah ini dipengaruhi total oleh aktifitas vulkanik gunungapi. Kondisi aliran permukaan sangat dipengaruhi oleh litologi penyusun daerah. Danau Tondano

merupakan salah satu contoh muara dari siklus hidrologi permukaan yang terdapat di bagian baratdaya (Effendi & Bawono,1997).

2.1.2 Stratigrafi Regional

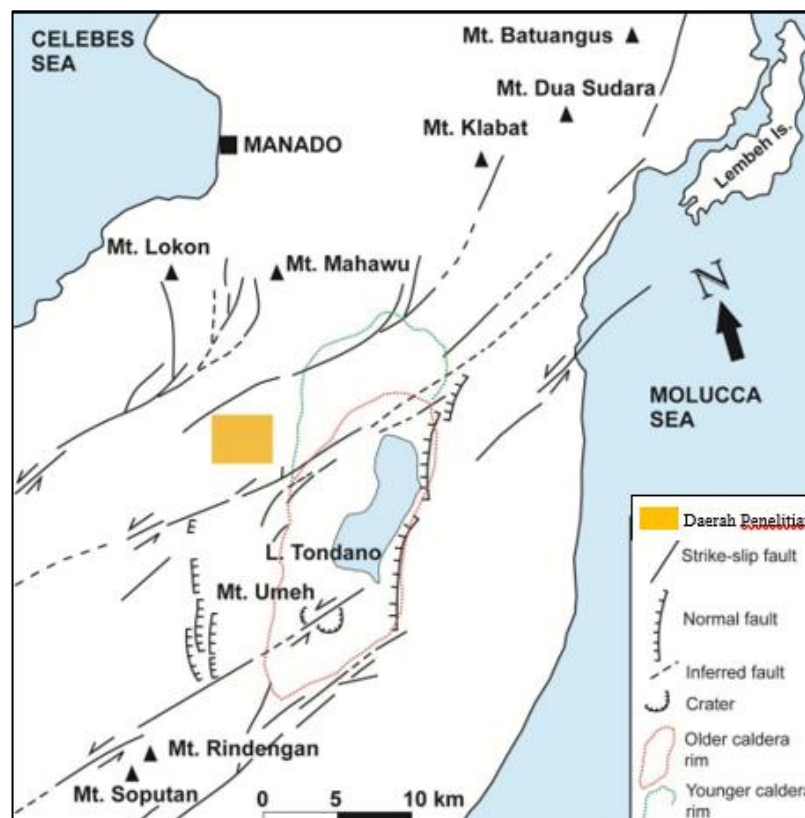
Batuan penyusun daerah Sulawesi Utara yang terangkum dalam Peta Geologi Regional Manado, Sulawesi Utara (Effendi & Bawono,1997), memaparkan bahwa kondisi stratigrafi tersusun oleh batuan sedimen dan endapan permukaan serta adanya material-material hasil aktivitas gunung api berupa batuan gunung apiberumur Tersier hingga Kuarter.

Material sedimen dan endapan permukaan disusun oleh endapan-endapan berupa alluvium (Qal), endapan danau dan sungai (Qs), serta adanya batugamping terumbu maupun koral (Ql) yang berumur kuarter. Sedangkan material batuan sedimen dan endapan permukaan yang terakumulasi pada zaman Tersier berupa breksi dan batupasir (Tps), dan batuan sedimen (Tms) berupa batupasir kasar, *greywacke*, batugamping napalan dan batugamping. Batuan gunungapi tersusun oleh batuan gunung api muda (Qv), tufa Tondano (Qtv) dan Gunung Tanuwantik (Qtvl), batugamping Ratatotok dan adanya batuan gunung api berupa lava andesit hingga basal (Tmv) serta adanya lava dasit (Tmvl) yang terbentuk pada zaman Tersier (Effendi & Bawono,1997).

2.1.3 Struktur dan Tektonik Regional

Sesar normal di lembar ini dominan berarah Barat Laut hingga Tenggara dan sebagian kecil mempunyai arah Timur Laut hingga Barat Daya. Daerah penelitian terletak pada bagian utara lengan utara Sulawesi yang merupakan busur

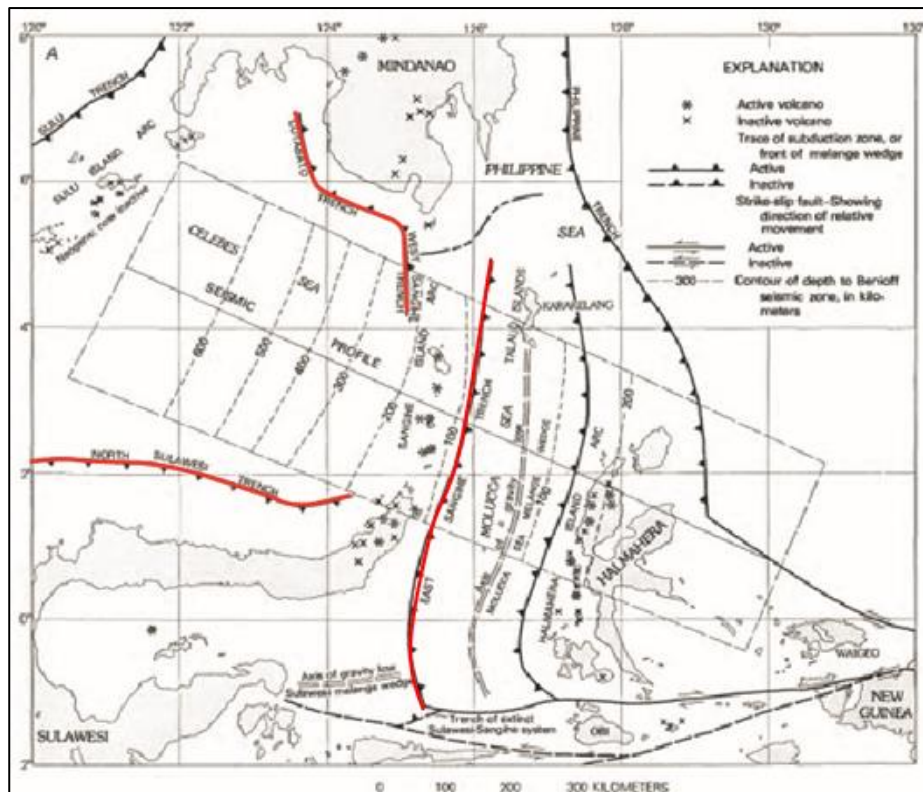
gunung api yang terbentuk karena adanya tunjaman ganda, yaitu lajur tunjaman Sulawesi Utara di sebelah Utara Lengan Utara Sulawesi dan lajur Tunjaman Sangihe Timur di sebelah Timur dan Selatan Lengan Utara (Lecuyer,1997) (Gambar 2.1).



Gambar 2. 1. Struktur regional Sulawesi bagian utara menurut Lecuyer, (1997).

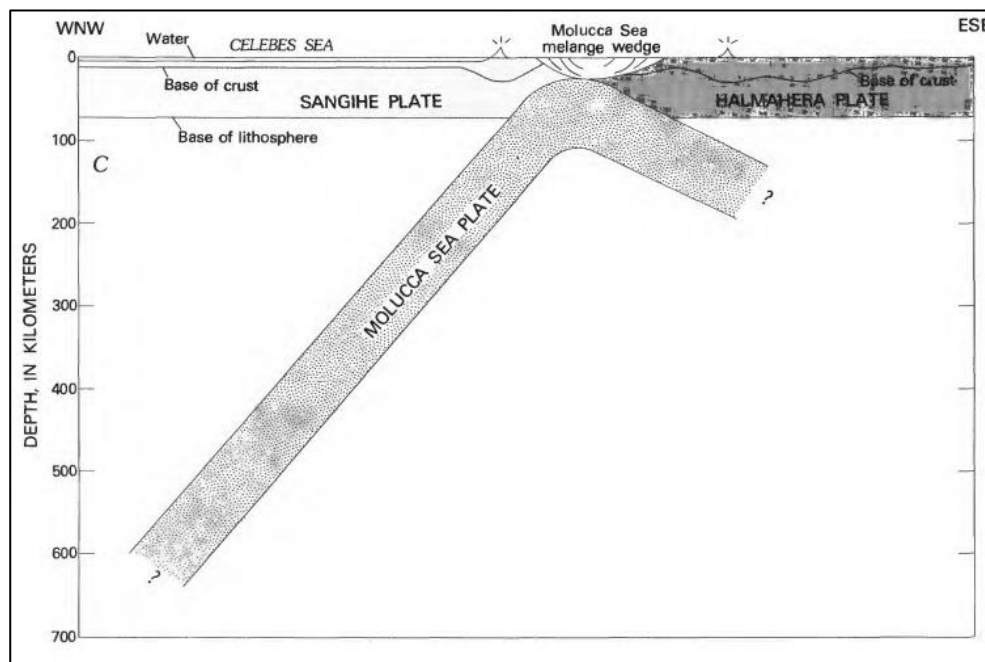
Penunjaman tersebut mengakibatkan terjadinya kegiatan magmatisme dan kegunungapian yang menghasilkan batuan plutonik dan gunung api yang tersebar luas. Tunjaman Sulawesi Utara diduga aktif sejak awal Tersier dan menghasilkan busur gunung api Tersier yang terbentang sekitar Tolitoli sampai dekat Manado. Penunjaman Sulawesi Utara (*North Sulawesi Trench*) terbentuk akibat adanya proses pemekaran Cekungan Laut Sulawesi (*Celebes Basin*) (Hamilton,1979) dan

bisa berkaitan dengan *West Sangihe Trench* yang menerus hingga *Cotabato Trench* yang menunjam pulau Mindanao Filipina (Gambar 2.2).



Gambar 2. 2. North Sulawesi Trench yang menunjam bagian utara Pulau Sulawesi dan West Sangihe Trench-Cotabato Trench yang menunjam Pulau Mindanao (Hamilton, 1979).

Sedangkan Tunjaman Sangihe Timur diduga aktif sejak awal kuartar dan menghasilkan Lajur gunung api Kuartar di bagian Timur Lengan Utara Sulawesi dan menerus ke arah Barat Daya hingga daerah gunung api Una-una (Effendi & Bawono,1997). Penunjaman Sangihe Bagian Timur mengindikasikan bahwa tidak menutupi dasar Laut Maluku dalam hal ini Lempeng Laut Maluku (*Molucca Sea Plate or Talaud Ridge*) pada area tersebut, hal itu mengindikasikan bahwa adanya gaya dorong dimana Lempeng Laut Maluku (*Molucca Sea Plate or Talaud Ridge*) bergerak relatif ke arah barat. (Hamilton,1979) (Gambar 2.3)

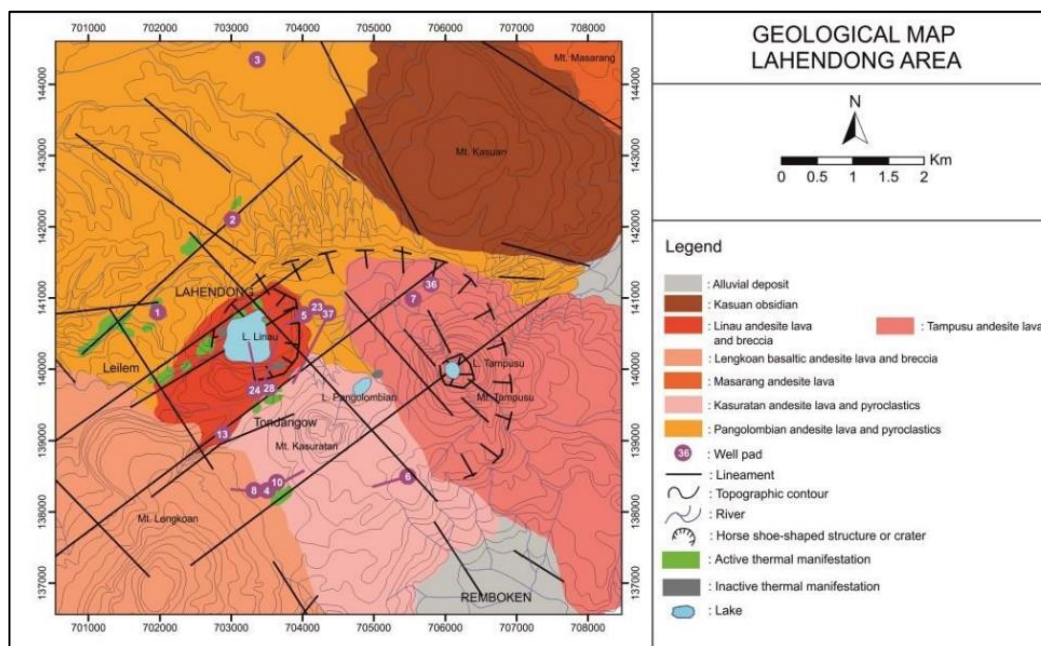


Gambar 2. 3. Penunjaman Sangihe Trench Bagian Timur dan Halmahera Island Arc (Hamilton, 1979)

2.2 Geologi Daerah Penelitian

Menurut Effendi & Bawono (1997) satuan batuan tertua yang tersingkap di daerah Minahasa adalah Batuan gunungapi berumur Tersier terdiri dari breksi, lava, dan tufa. Di dalam satuan ini juga terdapat sisipan batuan sedimen laut dangkal yang dijumpai pada sumur pemboran. Diatasnya diendapkan satuan Tufa Tondano yang berumur Kuarter berupa tufa berkomposisi riolitik yang banyak mengandung pecahan batupung (*pumice*) dan memiliki struktur aliran. Satuan ini diduga merupakan produk dari letusan Gunung Tondano Tua yang membentuk Kaldera Tondano. Selanjutnya merupakan batuan hasil letusan gunungapi berumur Kuarter dari beberapa gunungapi yang muncul setelah letusan Gunung Tondano Tua seperti Gunung Pangolombian, Gunung Tampusu, Gunung Lengkoan, Gunung Riendengan, Gunung Sempu serta Gunung Lokon dan

Gunung Soputan yang masih aktif hingga saat ini. Litologi permukaan daerah penelitian dapat diamati dalam peta geologi Area Lahendong oleh Utami (2011) (Gambar 2.4)



Gambar 2. 4. Peta geologi daerah Lahendong (Utami,2011)

2.2.1 Geomorfologi Daerah Penelitian

Geomorfologi daerah penelitian sebelumnya telah diidentifikasi dengan memperhatikan aspek seperti elevasi dan tampilan topografi area Lahendong. Daerah penelitian dibagi menjadi dua satuan bentangalam seperti :

2.2.1.1 Satuan Bentangalam Perbukitan Bergelombang

Dasar penamaan satuan bentangalam perbukitan bergelombang ini menggunakan pendekatan morfometri yaitu pengukuran kuantitatif bentuk bentangalam/morfologi yang mengontrol daerah penelitian didasarkan pada elevasi dengan beda tinggi 700 meter sampai 800 meter dan pendekatan

morfografi yaitu karakteristik topografi daerah penelitian. Satuan ini meliputi hampir seluruh daerah penelitian yang mencakup daerah Kasuratan, Pangolombian, Lengkoan, Leilem, dan Tampusu (Gambar 2.5). Satuan bentangalam ini disusun oleh litologi lava, breksi piroklastik, obsidian dengan struktur aliran



Gambar 2. 5 Kenampakan geomorfologi perbukitan bergelombang yang digunakan sebagai lokasi sumur produksi, difoto dari daerah Leilem ke arah N140°E.

2.2.1.2 Satuan Bentangalam Pedataran

Dasar penamaan satuan bentangalam perbukitan bergelombang ini menggunakan pendekatan morfometri yaitu pengukuran kuantitatif bentuk bentangalam atau morfologi yang mengontrol daerah penelitian didasarkan pada elevasi 700 meter dan pendekatan morfografi yaitu karakteristik topografi daerah penelitian yang cenderung datar. Satuan ini meliputi bagian sekitar Danau Linau dan daerah Remboken (Gambar 2.6). Pada satuan ini dijumpai litologi tufa, breksi piroklastik dengan fragmen yang didominasi oleh pumis



Gambar 2. 6. Kenampakan geomorfologi pedataran yang digunakan sebagai persawahan, difoto pada daerah Remboken difoto dari arah N321°E.

2.2.2 Stratigrafi Daerah Penelitian

Pada penelitian ini batuan di bawah permukaan dikelompokkan menjadi empat satuan, merujuk pada Utami (2011) urutan batuan dari tua ke muda adalah sebagai berikut.

2.2.2.1 Satuan Andesit Pra-Tondano

Satuan ini merepresentasikan batuan yang terbentuk sebelum pembentukan kaldera Tondano dan berhubungan dengan produk vulkanik Miosen dalam peta geologi regional yang dibuat oleh Effendi & Bawono (1997).

Penanggalan radiometrik pada sampel permukaan Gunung Kamingatan yang berhubungan dengan satuan ini menghasilkan umur 2.19 ± 0.03 juta tahun yang lalu atau Pliosen Akhir (Utami, 2011). Lava andesit satuan ini dalam

pengamatan serbuk bor (*Cutting*) menunjukkan struktur vesikuler, tekstur aliran, dengan fenokris berupa plagioklas dan piroksen. Fenokris terdiri 40% dari batuan, terdiri dari plagioklas jenis andesin lebih dominan daripada bitownit dan augit yang tertanam pada massa dasar yang berupa mikrolit plagioklas dan gelas vulkanik. Ditemukan pula apatit dan ilmenit yang hadir sebagai mineral aksesoris.

2.2.2.2 Satuan Riolit Tondano

Satuan ini terbentuk sebagai produk dari pembentukan kaldera Tondano pada kala Pliosen (Utami,2011). Penanggalan radiometrik K/Ar pada tufa lapilli dengan fragmen pumis dari daerah Toulimembet yang dianggap merepresentasikan produk hasil erupsi Tondano menunjukkan umur 0.871 ± 0.097 juta tahun yang lalu atau Pleistosen awal (Utami,2011).

Di bawah permukaan, satuan ini dicirikan oleh *rhyo-dacitic ignimbrites* yang kaya akan fragmen pumis, dan secara setempat memiliki perselingan dengan lava andesit. Kisaran ketebalan satuan ini antara 180 m hingga 400 m (Utami,2011). Secara umum lava andesit memiliki tekstur porfiritik dengan fenokris berupa plagioklas dan klinopiroksen yang tertanam pada massa dasar yang berupa mikrolit plagioklas dan gelas vulkanik.

Satuan ini tersusun atas lava andesit, breksi dengan fragmen andesit, lava riolitik, dan tufa. Secara umum komposisi mineralogi pada satuan ini tersusun oleh kuarsa, plagioklas (oligoklas lebih dominan daripada andesin), dan biotit yang tertanam pada massa dasar berupa kristal mikrolit plagioklas dan gelas vulkanik.

2.2.2.3 Satuan Andesit Pasca-Tondano

Satuan ini berhubungan dengan produk vulkanik setelah pembentukan kaldera Tondano. Satuan ini meliputi produk vulkanik dari Gunung Lengkoan, Gunung Pangolombian, Gunung Kasuratan, Gunung Tampusu, Gunung Kasuan, dan Gunung Linau. Satuan ini ditemukan di permukaan yang didominasi oleh lava andesitik-basaltik dan piroklastik yang di beberapa tempat dipisahkan oleh paleosoil yang tipis (Utami,2011).

Penanggalan radiometrik K/Ar dari sampel permukaan Linau dan Lengkoan menunjukkan umur batuan 0.458 ± 0.042 juta tahun yang lalu dan 0.586 ± 0.051 atau Pleistosen tengah (Utami,2011). Satuan ini tersusun oleh litologi tufa andesitik, lava andesit dengan fenokris piroksin, breksi dengan fragmen andesit dengan komposisi fenokris berupa plagioklas (jenis andesin lebih dominan dari bitownit) dan piroksen.





2.2.2.4 Satuan Diorit












Kehadiran intrusi diorit di bawah permukaan daerah penelitian, yang diketahui melalui sumur LHD-5, memotong satuan andesit pra-Tondano dan mengaburkan kontak antara satuan andesit pra-Tondano dengan satuan riolit Tondano. *Dyke* ini kemungkinan merupakan bagian dari suatu tubuh intrusi besar yang kehadirannya diprediksi dari model gravitasi (Utami,2011).

Pengamatan megaskopik dan petrografi inti bor pada satuan ini oleh Utami (2011) menunjukkan bahwa diorit memiliki struktur masif dan di beberapa tempat terpotong oleh urat-urat vertikal. Pengamatan petrografi menunjukkan tekstur

intersertal, dengan kristal berukuran kasar, mineral primer berupa plagioklas (dominasi jenis andesin) dan piroksen

Secara ringkas, satuan tertua di daerah penelitian adalah Satuan andesit pra-Tondano yang tersusun oleh lava andesit basaltik dan piroklastik dengan perselingan minor marl lanauan, water-laid tuff, dan batulanau tufaan. Ketebalan minimal satuan ini 1000 m. Andesit ini ditutup oleh satuan riolit Tondano yang berumur Pleistosen Awal yang tersusun oleh tufa riolitik yang sebagian terelaskan, secara setempat berseling dengan lava andesitik dan lava riolitik. Ketebalan satuan ini berkisar antara 400 m hingga 600 m. Satuan termuda adalah Satuan andesit pasca-Tondano dengan umur Pleistosen Tengah yang tersusun oleh lava basaltik andesit dan piroklastik dengan ketebalan bervariasi dari 50 m hingga 400 m. Satuan andesit pra-Tondano dan Satuan riolit Tondano dipotong oleh intrusi diorit dengan umur absolut yang belum diketahui. Stratigrafi batuan bawah permukaan di daerah penelitian yang dibuat oleh Utami (2011) (Gambar 2.7).

UMUR (JTL)	KEDALAMAN (METER)	SATUAN LITOLOGI	KOLOM STRATIGRAFI
PLISTOSEN TENGAH (0.458+0.042)	50-400	Post-Tondano Andesit: Lava andesit basaltik, tuff andesitik dan breksi	
PLISTOSEN AWAL (0.871+0.097)	400-600	Tondano Riolit: Tuff riolitik terelaskan dan tak terelaskan, lava riolit pumis dan breksi	
PLIOSEN AKHIR (2.19+0.03)	≤1000	Andesit pra-Tondano: Breksi andesit, lava, water laid tuff, batulanau tufaan	
		DIORIT	

LEGENDA			
	Tuff		Water laid tuff
	Tuff terelaskan		Batulanau tufaan
	Material vulkanik		Breksi tuff terubah
	Lava Andesit		Breksi Andesit
	Lava Riolit		Diorit
	Andesit terubah		

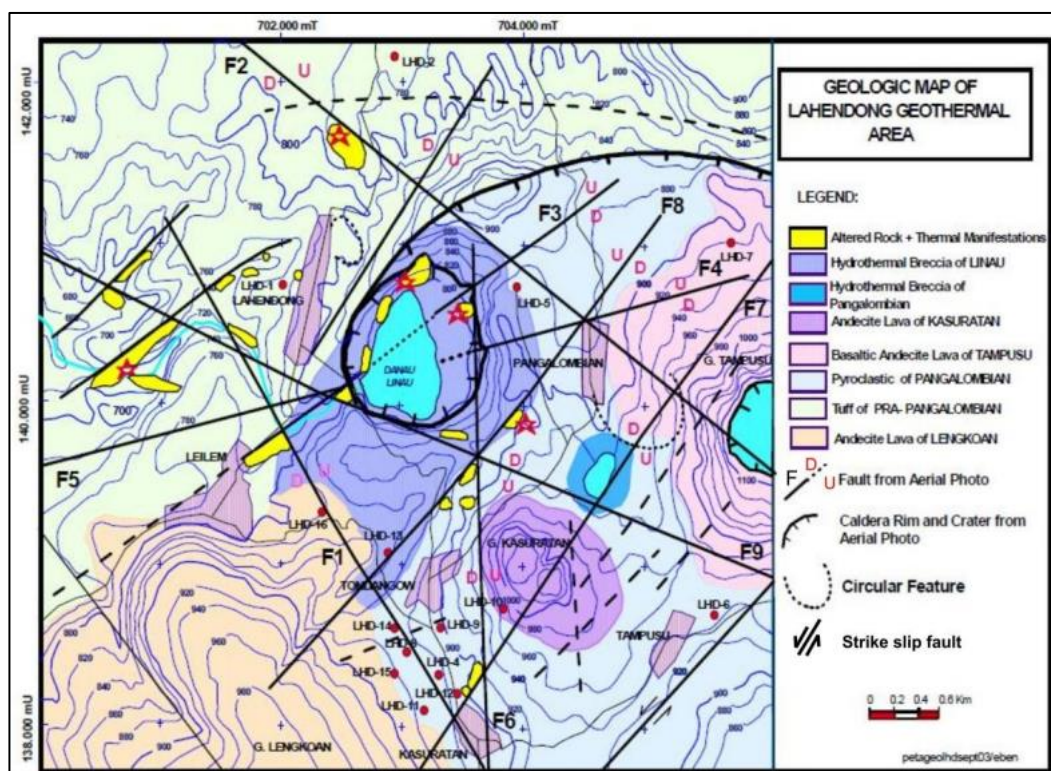
Gambar 2. 7. Stratigrafi daerah penelitian (Utami,2011)

2.2.3 Struktur Daerah Penelitian

Struktur yang berkembang di lapangan Lahendong didominasi oleh depresi *volcano-tectonic Tondano*. Daerah ini dikelilingi oleh aktivitas gunungapi di utara dan selatan (Utami,2011). Pada daerah sekitar Danau Linau sebagai kawah erupsi hidrotermal memiliki topografi yang berbukit-bukit (Siahaan,2003). Lapangan panasbumi Lahendong merupakan bagian dari struktur berbentuk tapal kuda berukuran panjang 4 km, lebar 3 km dan membuka ke arah barat daya yang disebut Utami (2011) yang disebut sebagai struktur Pangolombian. Tatanan tektonik yang kompleks pada daerah Lahendong merupakan pengaruh aktivitas vulkanik yang menghasilkan bentukan vulkanik berupa kaldera dan patahan. Zona patahan di sekitar Danau Linau memiliki sesar normal dan sesar *strike-slip* dengan

orientasi Timur Laut-Barat Daya, Barat Laut-Tenggara, Timur-Barat dan Utara-Selatan (Koestono dkk,2010).

Penyelidikan struktur di area lapangan panasbumi Lahendong telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, diantaranya oleh Siahaan. (2003). Struktur yang diselidiki berupa sesar *strike-slip*, sesar normal, dan struktur kaldera. (Siahaan,2003) pada peta geologi lapangan Lahendong (Gambar 2.8) menjelaskan bahwa terdapat sesar *strike-slip* mayor dengan arah orientasi timur laut-barat daya yang berlokasi di antara Danau Linau dengan Danau Tondano. Sesar tersebut kemudian mempengaruhi perkembangan Tondano dan Kaldera Pangalombian. Beberapa sesar mayor di Utara dan Selatan Danau Linau juga memiliki arah orientasi Timur Laut-Barat Daya.



Gambar 2. 8. Peta geologi lapangan panasbumi Lahendong yang memperlihatkan persebaran struktur pada daerah penelitian (Siahaan,2005)

2.3 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi meliputi sumber panas dan fluida yang memindahkan panas mengarah ke permukaan (Nicholson,1993). Sistem panas bumi dapat ditemukan dengan gradien panas bumi terutama pada daerah panas bumi sekitar margin lempeng dimana gradien panas bumi mungkin jauh lebih tinggi diatas rata-rata.

2.3.1 Komponen Penyusun Sistem Panas Bumi

Komponen sistem panas bumi yang lengkap terdiri dari tiga komponen utama, yaitu adanya batua reservoir yang permeabel, 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 (Goff & Janik,2000), dengan mekanisme konduksi dan konveksi (Hochstein & Browne,2000). Sistem panas bumi umumnya menghasilkan mata air panas dan fumarol sebagai manifestasi permukaan. Sumber daya panas bumi yang paling umum ditemukan di daerah yang memiliki aliran panas yang tinggi dan sirkulasi air yang baik. Daerah tersebut umumnya dijumpai pada sepanjang atau dekat dengan margin lempeng konvergen, dekat batas lempeng transformasi, *mid ocean ridge*, dan titik-titik *hot spot* (Goff & Janik,2000). Sistem panas bumi dijelaskan sebagai berikut :

1. Sumber panas (*Heat source*)

Sumber panas dari suatu sistem hidrotermal umumnya berupa tubuh intrusi magma. Sumber panas dapat berupa intrusi magmatik bersuhu sangat tinggi

(600°C) yang telah mencapai kedalaman yang relatif dangkal (5-10 km). Namun ada juga sumber panas hidrotermal yang bukan berasal dari batuan beku. Sumber panas lain dapat dihasilkan dari peristiwa *uplift basement rock* yang masih panas atau bisa juga berasal dari sirkulasi air tanah dalam yang mengalami pemanasan akibat adanya perlipatan atau patahan. Perbedaan-perbedaan sumber panas ini akan berimplikasi pada perbedaan suhu reservoir panasbumi secara umum, juga akan berimplikasi pada perbedaan sistem panas bumi.

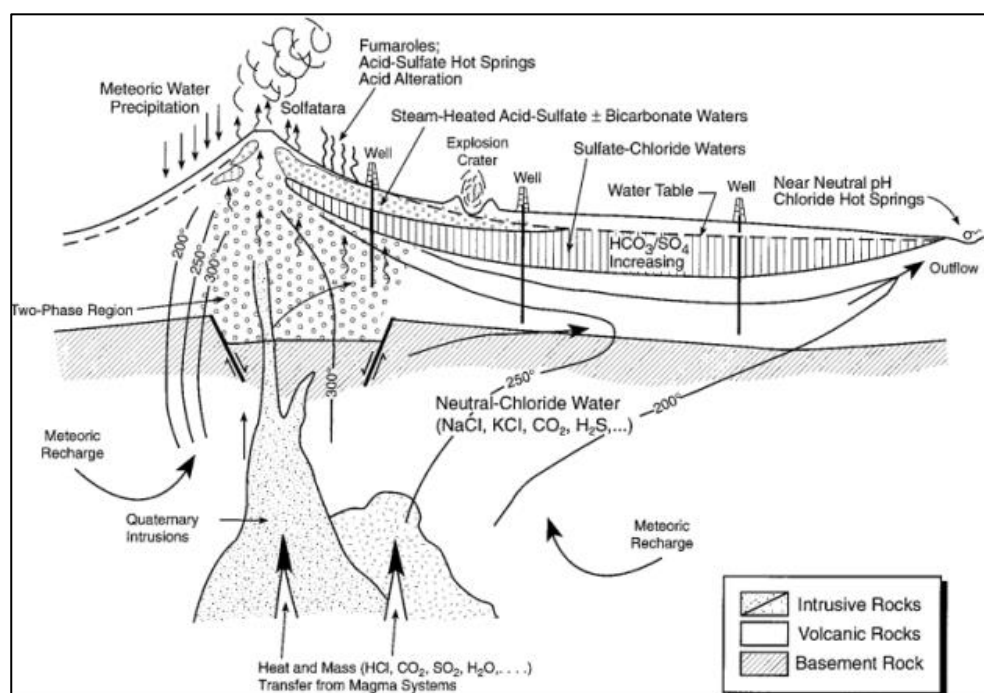
Secara umum sistem panas bumi dibagi menjadi dua jenis berdasarkan sumber panasnya (*heat source*) yaitu *volcanogenic* dan *non-volcanogenic* (Nicholson, 1993). Sistem panas bumi *volcanogenic* menyebutnya sebagai *high-T system associated with recent volcanic* dan sistem panas bumi *non-volcanogenic* sebagai *high-T system in tectonically active non-volcanic area* (Ellis & Mahon, 1977).

Volcanogenic system adalah sistem hidrotermal yang sumber panasnya berasal dari aktivitas magma. Intrusi magma yang bersifat andesitik, umumnya membentuk geometri intrusi dengan diameter kecil namun secara vertikal dekat dengan permukaan. Sedangkan magma yang bersifat asam, umumnya memiliki tubuh yang berdiameter lebar, namun secara vertikal jauh di bawah permukaan (Gambar 2.9).

Hochstein & Browne (2000) membagi sistem *volcanogenic* memiliki relief tinggi menjadi tiga sistem berdasarkan fase fluida di reservoir. Yaitu *liquid dominated system*, yang terbentuk jika permeabilitas batuan di reservoir tinggi,

sedangkan permeabilitas batuan di *recharge area* sedang. *Natural two-phase system*, terjadi jika permeabilitas di reservoir maupun di *recharge area*, bernilai sedang. Serta *vapor dominated system* apabila permeabilitas batuan reservoir tinggi, namun permeabilitas batuan sekitar rendah.

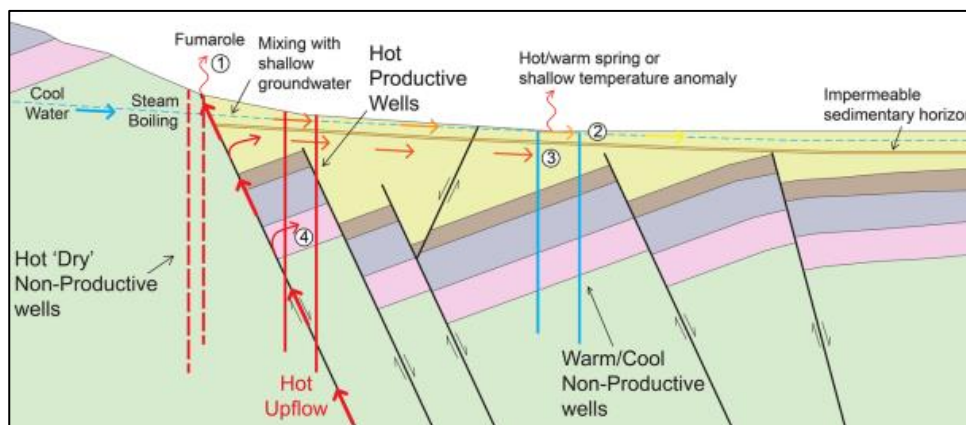
Sistem *volcanogenic* memiliki relief rendah umumnya terbentuk pada magma yang bersifat asam, yang menghasilkan erupsi eksplosif sehingga membentuk kaldera yang luas. Selain itu, sistem *volcanogenic* juga dapat dihasilkan oleh proses *rifting* pada batas antar lempeng yang saling menjauh. Pada seting tektonik ini, magma yang terbentuk umumnya bersifat *basaltic*, fluida hidrotermal berasal dari magma serta infiltrasi dari punggungan di sisi *rift*.



Gambar 2. 9. Sistem Panas Bumi Volcanogenic (Goff & Janik,2000)

Non-volcanogenic system ialah sistem hidrotermal yang sumber panasnya tidak berkaitan dengan aktivitas vulkanisme. Nicholson (1993) menjelaskan

bahwa panas pada sistem ini dapat dihasilkan dari peristiwa *uplift basement rock* yang masih panas, atau bisa juga berasal dari sirkulasi air tanah dalam yang mengalami pemanasan akibat adanya perlipatan atau patahan, serta adanya panas residual pada batuan beku pluton. Sistem ini dapat menghasilkan fluida dengan temperatur tinggi hingga rendah (Gambar 2.10).



Gambar 2. 10. Sistem panas bumi *Non-volcanogenic* (Richards and Blackwell, 2002)

Goff & Janik (2000) menjelaskan adanya model tektonik yang merupakan konseptual model dari sistem geotermal yang terletak di lingkungan tektonik ekstensi. Pada zona ekstensi, seperti pada zona *rifting*, terjadi penipisan kerak akibat adanya *stretching* pada kerak yang saling menjauh. Penipisan ini mengakibatkan batuan mantel menjadi lebih dekat ke permukaan yang menghasilkan gradien suhu yang lebih besar serta adanya anomali aliran panas pada zona-zona sesar turun. Adanya sirkulasi dalam yang menuju graben menjadi suplai fluida yang akan terpanaskan dan terakumulasi pada reservoir, kemudian bergerak ke permukaan melewati zona permeabel dari sesar-sesar tersebut.

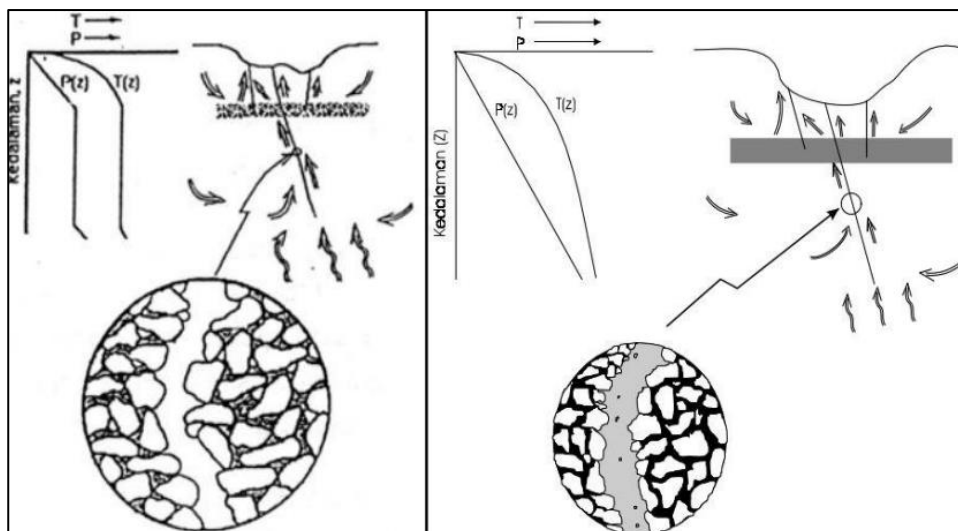
Nicholson (1993) memberikan contoh lain sistem panasbumi yang tidak berkaitan langsung dengan proses magmatisme yang disebut *geopressured system*. Panas pada sistem ini dihasilkan oleh tekanan bebatuan itu sendiri. Sistem ini umumnya memiliki suhu yang rendah. Pada sistem ini air yang berkontribusi umumnya berupa air formasi (*connate water*) yang terperangkap dalam batuan sedimen sehingga menghasilkan fluida yang bersifat klorida dan memiliki salinitas tinggi atau disebut *brine water*.

2. Batuan reservoir

Batuan yang dapat menyimpan dan meloloskan air dalam jumlah yang signifikan karena memiliki porositas dan permeabilitas yang cukup baik. Batuan reservoir juga sangat berpengaruh terhadap komposisi kimia dari fluida hidrotermal. Sebab fluida hidrotermal akan mengalami reaksi dengan batuan reservoir yang akan mengubah kimiawi dari fluida tersebut. Nicholson (1993) menjelaskan bahwa batuan vulkanik, sedimen klastik, dan batuan karbonat umumnya akan menghasilkan fluida hidrotermal dengan karakter kimia yang dapat dibedakan satu dengan yang lainnya.

Nicholson (1993) membagi lagi sistem bersuhu tinggi menjadi *liquid dominated* dan *vapor dominated* sistem berdasarkan fase fluida yang dominan pada batuan reservoir. Sistem dominasi air yaitu sistem panas bumi yang sumurnya menghasilkan fluida dua fasa berupa campuran uap dan air. Dalam sistem dominasi air, diperkirakan air mengisi rongga, saluran terbuka atau rekahan-rekahan pada batuan (Gambar 2.11). Diperkirakan 80% dari batuan

reservoir terdiri dari air. Pada sistem dominasi air, baik tekanan maupun suhu tidak konstan terhadap kedalaman (Saptadji,2004).



Gambar 2. 11. Ilustrasi pengisian rongga dan suhu serta tekanan sistem panas bumi dominasi uap (kiri) dan dominasi air (kanan) (Saptadji, 2004).

Bersasarkan suhu dari suatu reservoir, Hochstein & Browne (2000) membagi sistem panasbumi menjadi tiga yaitu bersuhu rendah, bersuhu sedang (*intermediate*) dan bersuhu tinggi. Sistem bersuhu rendah memiliki suhu reservoir kurang dari 125°C, sistem bersuhu sedang dengan suhu reservoir 125°C sampai 225°C, dan sistem yang bersuhu tinggi dengan suhu reservoir lebih dari 225°C seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Pembagian suhu sistem Panas Bumi menurut Hochstein (1990)

Klasifikasi Sistem Panas Bumi	Kisaran Suhu
Suhu rendah	<125°C
Suhu sedang	125°C -225°C
Suhu tinggi	>225°C

3. Batuan penutup (*Cap rock*)

Merupakan tubuh batuan impermeabel, yang menutup reservoir sehingga panas fluida dalam reservoir dapat dicegah untuk keluar secara langsung ke permukaan.

4. Fluida panas bumi

Cairan yang umumnya dalam fase uap atau cair, tergantung pada suhu dan tekanannya. Air ini sering membawa serta bahan kimia dan gas seperti karbon dioksida (CO₂) dan hydrogen sulfida (H₂S) (Dickson & Fanelli, 2003). Menurut Nicholson (1993) menyebutkan ada 4 (empat) macam fluida panas bumi, yaitu:

1. Air meteorik atau air permukaan, air yang berasal dari presipitasi atmosferik atau hujan, yang mengalami sirkulasi dalam hingga beberapa kilometer.
2. Air formasi atau (*connate water*), air yang merupakan air meteorik yang terperangkap dalam formasi batuan sedimen dalam kurun waktu yang lama. Air formasi mengalami interaksi yang intensif dengan batuan yang menyebabkan air ini menjadi lebih *saline*.
3. Air metamorfik, air yang berasal dari modifikasi khusus dari air formasi yang berasal dari rekristalisasi mineral *hydrous* menjadi mineral yang kurang *hydrous* selama proses metamorfisme batuan.
4. Air magmatik, Ellis & Mahon (1977) membagi fluida magmatik menjadi dua jenis, yaitu air magmatik yang berasal dari magma namun pernah

menjadi bagian dari air meteorik dan air *juvenile* yang belum pernah menjadi bagian dari meteorik.

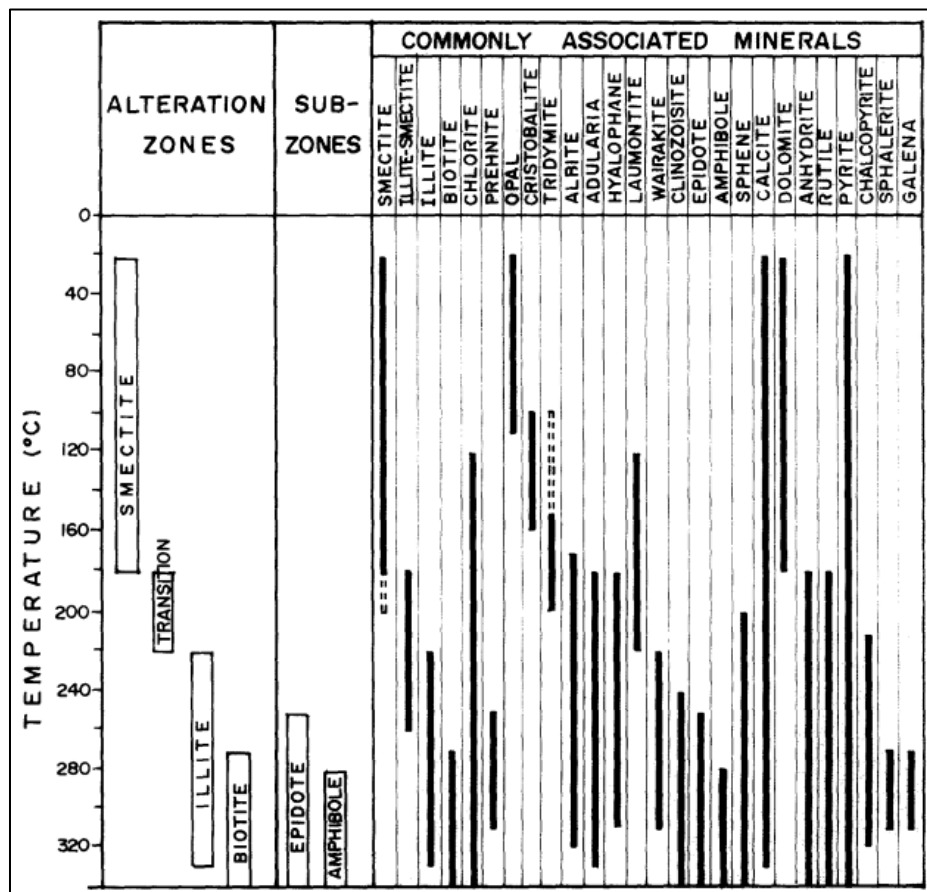
Pembagian berdasarkan asal fluida ini disampaikan oleh Ellis & Mahon (1977). Mereka membagi sistem panasbumi menjadi *cyclic system* dan *storage system*.

1. *Cyclic system*, yaitu suatu fluida hidrotermal yang berasal dari air meteorik yang mengalami infiltrasi dan masuk jauh ke bawah permukaan, kemudian terpanaskan, dan bergerak naik ke permukaan sebagai fluida panas. Pada sistem ini, air meteorik mengalami *recharge* dari hujan dan infiltrasi, sehingga siklus sistem berjalan terus menerus.
2. *Storage System*, terbentuk apabila air tersimpan pada batuan dalam skala waktu geologi yang cukup lama dan terpanaskan secara insitu, baik sebagai fluida dalam formasi maupun sebagai air dari proses hidrasi pada mineral.

2.4 Alterasi Hidrothermal

Alterasi hidrotermal umumnya menjadi indikasi dalam perubahan mineralogi dengan interaksi dengan batuan sampling (*wall rock*) dengan fluida hidrotermal (Corbett,2018). Adanya identifikasi aktivitas panas bumi yang bervariasi pada tatanan tektoniknya. Hal ini juga dapat tercermin dalam keadaan geologi bawah permukaan. Umumnya beberapa sumur dapat memotong beberapa jenis intrusi, komposisi, tekstur, ukuran dan intensitas alterasi yang juga dapat menentukan jenis serta suhu alterasinya. Beberapa fase ini mungkin secara

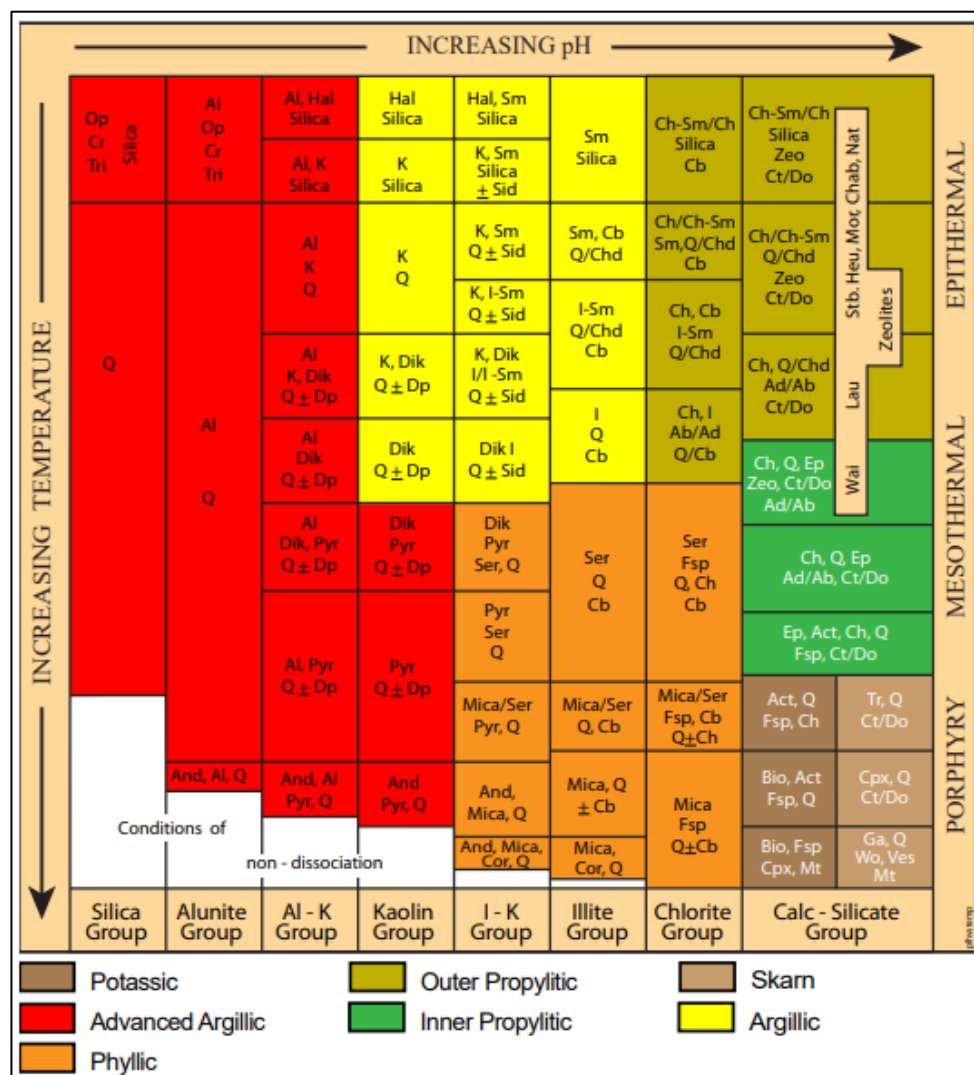
genesa terkait dengan magmatisme yang terkait dengan gunung berapi di atasnya (Reyes,1990). Pengelompokan mineral alterasi berdasarkan grupnya dapat menjadi rujukan. Selain dikelompokkan berdasarkan tipe alterasinya, kumpulan mineral sekunder digunakan untuk memperkirakan kisaran suhu pembentukan mineral dan suhu masa lampau pada sistem panas bumi. (Reyes,1990) (Gambar 2.12)



Gambar 2. 12. Klasifikasi grup mineral alterasi berdasarkan zona alterasi dan suhu terbentuknya (Reyes,1990).

Dalam pembentukan suatu mineral hidrotermal besaran pH dan suhu mineral alterasi hidrotermal dapat diidentifikasi karena umumnya suatu kelompok mineral terbentuk pada pH yang konsisten tapi dengan variasi suhu yang berbeda.

Selain itu identifikasi suatu mineral berdasarkan berbagai variasi warna. Pengelompokan mineral hidrotermal dari analisis sistem panas bumi diklasifikasikan menurut (Corbett & Leach,1998) (Gambar 2.13)



Gambar 2. 13. Alterasi mineral sistem hidrotermal berdasarkan pH dan suhu (Corbett & Leach,1998)

Pembentukan mineral hidrotermal tergantung pada suhu, permeabilitas, tekanan, komposisi fluida, komposisi dan jenis *host rock*, permeabilitas, dan durasi aktivitas hidrotermal. Hal-hal ini sama dengan indikasi pembentukan deposit bijih, namun panas bumi identifikasi permeabilitas, suhu, dan komposisi

fluida menjadi indikasi penting. Sebagian besar sistem yang didominasi air memiliki suhu reservoir sekitar 280°C hingga suhu maksimal diatas 300°C (Browne,1978). Tekanan fluida pada daerah panas bumi berkisar pada 200 bar (Browne,1978). Perubahan tekanan fluida dapat mempengaruhi komposisi fluida misalnya dimana terjadi pendidihan mengakibatkan hilangnya CO₂. Zona pendidihan bawah permukaan sering dicirikan dengan kehadiran kuarsa sekunder, K-feldspar, dan kalsit (Browne,1978).

Batuan asal (*host rock*) mempengaruhi alterasi hidrotermal terutama permeabilitas dari tekstur dan porositas. Mineralisasi awal dari batuan reservoir alterasi kesetimbangan diatas 280°C membentuk albit, K-feldspar, klorit, Oksida besi, epidot, kalsit, kuarsa sekunder, ilit, dan pirit. Namun pada suhu yang lebih rendah, zeolit dengan silika tinggi umum ditemukan. Studi mengenai alterasi pada panas bumi terkait dengan permeabilitas pada deposisi mineral hidrotermal. Pada batuan dengan permeabilitas rendah, kesetimbangan antara batuan dengan fluida reservoir jarang tercapai hal yang menyebabkan alterasi hidrotermal lebih sedikit bahkan pada suhu tinggi karena akses aliran fluida terlalu sulit (Browne,1978).

Menurut Corbett & Leach (1996), alterasi hidrotermal secara spesifik dibagi kedalam beberapa tipe alterasi berdasarkan kelompok mineralnya. Pembagian tipe tersebut adalah sebagai berikut :

1. Alterasi argilik lanjut dicirikan oleh kumpulan mineral yang terbentuk pada kondisi asam pH (<4). Contohnya mineral silika, alunit, kaolinit, dioktit dan pirofilit.

2. Alterasi tipe argilik terdiri dari kumpulan mineral yang terbentuk pada suhu yang relatif rendah ($<200^{\circ}\text{C}$ - 250°C) dengan kondisi fluida asam (pH 4-5). Berdasarkan Rose & Bart (1979) tipe alterasi ini mencakup kumpulan mineral yang didominasi oleh kaolinit dan smektit. Sebagian mineral bersuhu rendah seperti kaolin dan illit tidak digolongkan pada tipe alterasi tipe serisitik/filik, tetapi dimasukkan dalam golongan alterasi tipe argilik. Alterasi tipe argilik juga terdiri dari kelompok mineral klorit.
3. Alterasi tipe filik terbentuk pada kisaran pH yang sama dengan alterasi tipe argilik, namun pada suhu yang lebih tinggi ($>200^{\circ}\text{C}$ - 250°C), dan dicirikan dengan kehadiran serisit atau muskovit. Zona filik dicirikan oleh mineral bersuhu tinggi seperti kelompok kaolin (pirofilin-andalusit) dan grup mineral klorit.
4. Alterasi tipe propilitik terbentuk pada kondisi netral hingga basa, dicirikan dengan kehadiran mineral epidot dan/atau klorit (Meyer & Hemley, 1967). Albit sekunder dan K-Feldspar umum dijumpai sebagai kumpulan mineral alterasi zona propilitik. Pada suhu yang lebih rendah (200°C - 250°C) ketika zeolit ditemukan bersama dengan epidot sebagai mineral alterasi, dapat digolongkan pada tipe alterasi sub-propilitik.
5. Alterasi tipe potasik terbentuk pada suhu tinggi dengan kondisi netral hingga basa, dicirikan dengan kehadiran mineral biotit dan/atau K-feldspar, magnetit, aktinolit, klinopiroksin. Ketika *host rock* berupa batuan sedimen karbonat, alterasi tipe skarn akan muncul pada kondisi ini dengan mineral penciri Ca-garnet, klinopiroksin dan tremolit.

2.5 Tekanan dan Suhu

Nilai tekanan umum digunakan pada investigasi panas bumi untuk mengetahui *water level* atau tekanan pada kepala sumur (*well head*) ketika sumur meluap, untuk menentukan potensi dari suatu sistem panas bumi pada suatu lapangan. Hal ini merupakan cara yang cukup baik untuk menentukan tekanan jika suhu seragam dari air permukaan hingga akuifer utama suatu sumur dan tidak ada aliran air atau pendidihan di dalam sumur. *Logging* tekanan sumur panas bumi banyak digunakan di sumur dengan suhu tinggi. *PTS Survey* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam uji sumur untuk mengetahui kondisi dari sumur dengan mendapatkan nilai tekanan, temperatur, kontribusi *feedzone* dan lokasi *feedzone*. Untuk mengetahui hal tersebut, sebelumnya dilakukan akuisisi data dengan cara menurunkan *PTS Tools* yang terdiri komponen utama berupa *spinner*. Alat ini diturunkan dengan menggunakan kabel kemudian *spinner* yang berada di paling bawah peralatan akan mulai berputar jika ada fluida yang mengalir melewatinya (Gambar 2.14)



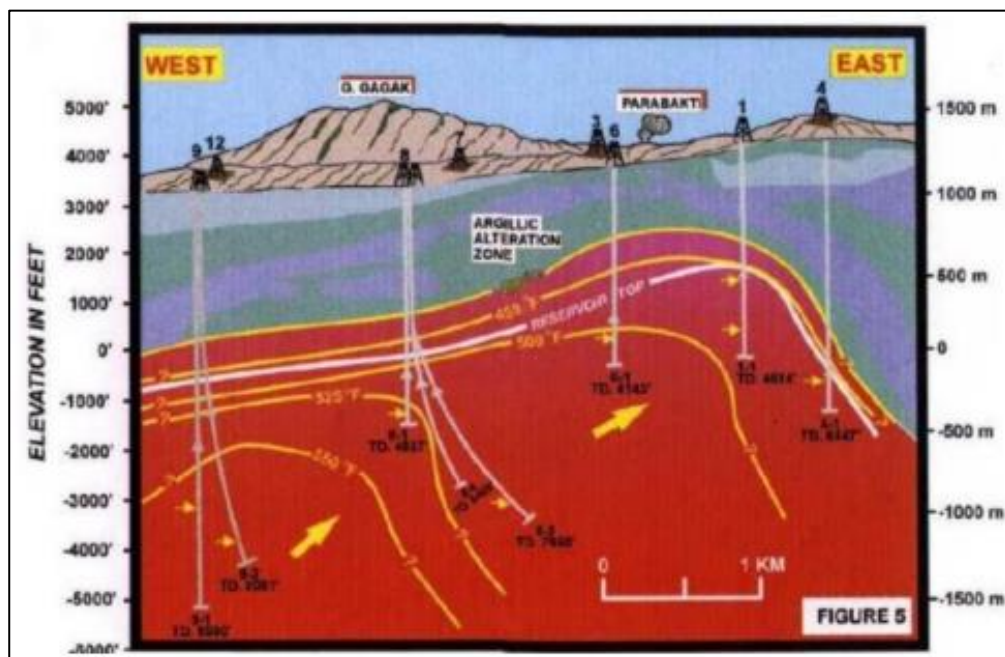
Gambar 2. 14. Proses pengukuran data *Pressure-Temperature-Spinner Survey* (PTS) daerah penelitian.

Log Temperature adalah suatu nilai yang direkam pada kedalaman tertentu yang berada pada lubang bor. Log dapat memberikan informasi tentang kondisi suhu, arah aliran, dan *feed zone* reservoir yang ditembus oleh sumur. Namun tidak sembarang dalam menafsirkan log karena pengukuran tidak dilakukan secara langsung pada reservoir, tetapi pada sumur yang mana terdapat *internal flows* dan *boiling* dapat menyebabkan gangguan dan data yang tidak akurat meskipun sumur telah ditutup. Dikarenakan sumur tidak mengalir, akuifer (*feed zone*) biasanya mengalami peningkatan suhu lebih lambat setelah pengeboran daripada batuan impermeabel (Stefánsson dan Steingrímsson, 1990).

2.6 Identifikasi Sistem Panas Bumi

Model sistem panasbumi pada suatu daerah umumnya menggambarkan komponen sistem meliputi sumber panas, reservoir, suhu, sumber air, serta manifestasi panasbumi permukaan yang terdapat di daerah tersebut. Komponen lain yang sering digambarkan dalam bentuk model adalah penyebaran batuan, jenis alterasi, jenis dan arah aliran air di bawah permukaan. Identifikasi sistem panas bumi dapat diinterpretasi menggunakan data rekaman pengeboran yang berisi informasi geologi bawah permukaan.

Keunikan karakteristik dari masing-masing sistem panasbumi merupakan pengaruh dari berbagai faktor, antara lain geometri dari batuan sumber panas, struktur geologi, permeabilitas, topografi, serta hidrologi permukaan (Saptadji, 2004). Contoh model sistem panas bumi ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15. Model konseptual sistem panasbumi lapangan Awibengkok (Saptadji, 2004)

Reservoir umumnya berada pada kedalaman dengan adanya kondisi *partial loss circulation* (PLC) atau *total loss circulation* (TLC) yaitu kondisi ketika lumpur pengeboran masuk ke formasi.

Hal tersebut diinterpretasikan bahwa terdapat zona permeabel di bawah permukaan. Selain itu kelimpahan ion Klorida (Cl) yang terekam selama pengeboran juga akan mengalami peningkatan drastis ketika memasuki zona reservoir. Berdasarkan penciri mineral sekunder, umumnya zona reservoir dicirikan oleh mineral *hydrous* contohnya kuarsa sekunder, adularia, wairakit, pirit, anhidrit, kalsit, illit, hyalopan (Reyes,1998).