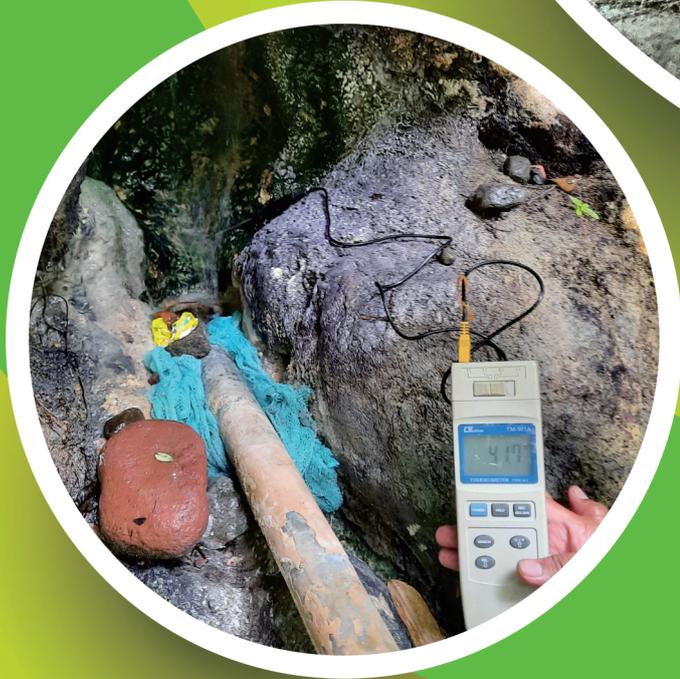


NO : 15
ISSN : 0261-0811



**Buku 3 : Kelompok Kerja
Keprospekan
dan Evaluasi
Sumber Daya
dan Cadangan
Panas Bumi**

PROSIDING

Hasil Kegiatan

PUSAT SUMBER DAYA MINERAL

BATUBARA DAN PANAS BUMI

Tahun Anggaran 2023

Nomor: 15

ISSN : 0261-0811

**PROSIDING HASIL KEGIATAN
PUSAT SUMBER DAYA MINERAL BATUBARA DAN PANAS BUMI
TAHUN ANGGARAN 2023**

BUKU 3
KELOMPOK KERJA KEPROSPEKAN DAN EVALUASI
SUMBER DAYA DAN CADANGAN
PANAS BUMI



**KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL
BADAN GEOLOGI
PUSAT SUMBER DAYA MINERAL BATUBARA DAN PANAS BUMI**

Editor : Ir. Arif Munandar, Dikdik Risdianto, S.T., M.T., Dudi Hermawan, S.T.,
dan Ir. Rina Wahyuningsih

Layout & Desain : Eko Suryanto, S.Kom

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas terbitnya prosiding hasil kegiatan Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi Tahun Anggaran 2023. Makalah-makalah yang diterbitkan pada prosiding ini merupakan hasil kegiatan lapangan dan non lapangan pada tahun 2023.

Prosiding ini terdiri dari tiga buku. Buku 1 berisi tentang hasil kegiatan Kelompok Kerja Mineral, Buku 2 berupa hasil kegiatan Kelompok Kerja Batubara dan Buku 3 hasil kegiatan Kelompok Kerja Panas Bumi. Pada buku ketiga ini berisi sebanyak 13 (tiga belas) makalah yang merupakan hasil penyelidikan lapangan dan non lapangan. Makalah-makalah ini berisi tentang hasil survey pendahuluan, survei rinci menggunakan metode geologi, geokimia dan geofisika serta pengeboran landaian suhu pada beberapa wilayah yang memiliki potensi panas bumi di Indonesia. Sedangkan makalah hasil kegiatan non lapangan berupa pemutakhiran data neraca panas bumi. Kegiatan tersebut dilaksanakan dalam rangka mendukung kegiatan eksplorasi panas bumi oleh pemerintah yang bertujuan meningkatkan kualitas data dan informasi geosains panas bumi dan/atau meningkatkan status sumber daya dan cadangannya sehingga dapat dimanfaatkan untuk pengembangan panas bumi selanjutnya.

Adanya prosiding ini sebagai upaya penyebaran informasi hasil kegiatan Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi selama Tahun 2023 kepada masyarakat. Diharapkan dapat dijadikan salah satu rujukan untuk penentuan kebijakan dan kajian sumber daya mineral dan energi selanjutnya.

Semoga prosiding ini bermanfaat bagi pembaca.

Bandung, Juli 2024

Kepala Pusat Sumber Daya Mineral
Batubara dan Panas Bumi

DAFTAR ISI

1. Survei Pendahuluan Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Angges, Kabupaten Kepulauan Sangihe, Provinsi Sulawesi Utara	1
2. Survei Rinci Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara	27
3. Pengeboran dan Survei Landaian Suhu Panas Bumi di Daerah Gunung Endut (2 X 500 m).....	37
4. Survei Rinci Geologi, Geokimia, Gaya Berat dan <i>Audio Magnetotellurik</i> Daerah Panas Bumi Muaro Paiti, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat	51
5. Pemutakhiran Data dan Neraca Sumber Daya Panas Bumi Tahun 2023	63
6. Survei Rinci MT dan TDEM Daerah Panas Bumi Bora Pulu, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah	75
7. Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Sipoholon Ria Ria, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara	89
8. Survei Rinci Geologi, Geokimia, Gaya Berat dan Audio Magnetotellurik Daerah Panas Bumi Muaro Paiti, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat	105
9. Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Bora-Pulu, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah	117
10. Survei Rinci Geokimia Daerah Panas Bumi Sipoholon Ria Ria, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara	135
11. Survei Rinci <i>Magnetotellurik</i> dan <i>Time Domain Electromagnetic</i> , Daerah Panas Bumi Adum, Kabupaten Lembata, Provinsi Nusa Tenggara Timur	159
12. Survei Rinci Gaya Berat Daerah Panas Bumi Bora Pulu, Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah	171
13. Survei Rinci Geokimia Daerah Panas Bumi Bora-Pulu, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah	183

SURVEI PENDAHULUAN GEOLOGI DAN GEOKIMIA DAERAH PANAS BUMI ANGGES KABUPATEN KEPULAUAN SANGIHE, PROVINSI SULAWESI UTARA

Santia Ardi Mustofa, Widya Asoka Suleman, dan Dede Iim Setiawan

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Angges terletak di Kabupaten Kepulauan Sangihe, Sulawesi Utara. Tujuan utama dari penyelidikan ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis potensi panas bumi di daerah tersebut. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur, survei lapangan, analisis laboratorium, analisis studio, serta pengolahan data.

Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa daerah panas bumi Angges memiliki manifestasi panas bumi berupa mata air panas yang tersebar di dua lokasi, yaitu Sungai Kadodo dan Sungai Kokombie. Air panas di Sungai Kadodo memiliki temperatur antara 38,2°C hingga 41,4°C, sedangkan di Sungai Kokombie berkisar antara 39,5°C hingga 42,0°C. Analisis geokimia menunjukkan adanya kandungan silika dan beberapa unsur terlarut yang signifikan.

Secara geomorfologi, daerah ini terdiri dari tiga satuan utama, yaitu Geomorfologi Vulkanik Awu, Geomorfologi Vulkanik Pusunge, dan Geomorfologi Vulkanik Tahuna. Studi stratigrafi mengidentifikasi tujuh satuan batuan utama yang mendasari daerah ini, dengan dominasi batuan gunungapi andesit-basaltik.

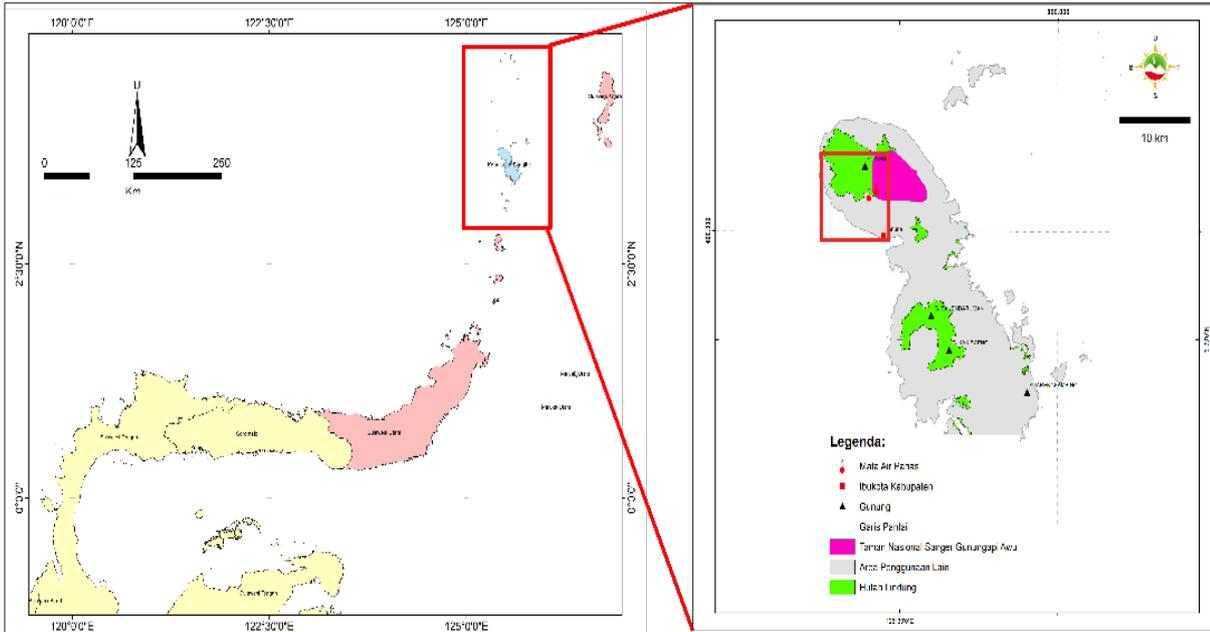
Penyelidikan ini menyimpulkan bahwa daerah panas bumi Angges memiliki potensi sebesar 7 MWe pada kelas sumber daya spekulatif dengan perkiraan temperatur reservoir sebesar 150-160 °C.

Kata kunci: Angges, Sangihe, Gunung Awu, Survei Pendahuluan, Panas Bumi

PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Angges berada di Kabupaten Kepulauan Sangihe, Provinsi Sulawesi Utara. Koordinat daerah penyelidikan adalah 125°24'14,4"-125°29'9,6" BT dan 3°36'18"-3°42'0" LU.

Klasifikasi tata guna lahan yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2017), daerah panas bumi Angges terletak pada area Hutan Lindung, Taman Nasional Sanger Gunungapi Awu, dan Area Penggunaan Lain (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi dan Tata Guna Lahan

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penyelidikan ini dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu studi literatur, survei lapangan, analisis laboratorium, analisis studio, serta pengolahan data.

Studi literatur dilakukan dengan studi penyelidikan terdahulu tentang kepanasbumian, tatanan tektonik daerah penyelidikan, serta literatur lain terkait dengan daerah penyelidikan. Survei lapangan dilakukan untuk mengetahui sebaran litologi dan struktur, mengukur parameter fisik manifestasi, pengambilan contoh baik batuan, tanah, dan air. Analisis laboratorium meliputi analisis petrografi, XRF, analisis unsur terlarut, isotop stabil, Hg dan CO₂ tanah. Analisis studio digunakan untuk analisis citra penginderaan jauh dan data hasil survei lapangan, yang kemudian dikumpulkan

menjadi satu untuk diolah menjadi suatu model panas bumi.

GEOLOGI REGIONAL

Tatanan tektonik Pulau Sangihe terbentuk dari pertemuan 3 lempeng utama dunia, yaitu lempeng Pasifik, Indo-Australia dan lempeng Eurasia bagian tenggara (Hamilton, 1979 dan Cardwell & Isak, 1981), dengan arah pergerakan yang berbeda dan menghasilkan beberapa sempalan lempeng kecil. Implikasi dari kondisi tektonik tersebut menghasilkan pola penunjaman ganda, serta busur gunung api Sulawesi Utara-Sangihe dan Halmahera Barat.

Berdasarkan peta geologi lembar Sangihe dan Siau (Samodra, 1994), daerah panas bumi Angges tersusun oleh Batuan gunung api Biaro (Tnbv), Batuan gunung api Sahendaruman (QTsv), Batuan

Terobosan Andesit, Diorit (Q_{Ti an,di}), formasi Pintareng (Q_{pp}), Batuan gunung api Awu (Q_{hav}), Aluvium (Q_a).

Formasi tertua di daerah ini adalah **Batuan Gunung Api Biaro (T_{nbv})** yang berumur Tersier berupa perulangan breksi gunung api dan lava, bersisipan tuf lapilli dan batu pasir tufan. Breksi gunung api berkemas terbuka dan terpilah buruk, dikuasai oleh komponen andesit dan basal. Sebagian lavanya amigdaloid, bersusunan andesit-basal dengan kenampakan struktur bantal. Beberapa sisipan tuf lapilli lapuk mempunyai tebal 2-3 m. Batupasir tufan yang berukuran sedang kasar berstruktur perarian sejajar dan tak berfosil. Korelasinya dengan satuan sejenis di lengan utara Sulawesi memberi kesan umumnya adalah Miosen Akhir-Pliosen Awal. Lingkungan pengendapannya adalah darat peralihan. Tebal satuan lebih dari 300 m. Pulau Biaro dimana satuan tersingkap jelas diusulkan menjadi stereotipnya.

Batuan Gunung Api Sahendaruman (Q_{tsv}) merupakan perulangan breksi gunung api dan lava, tuf, aglomerat, bersisipan tuf lapilli dan batu pasir tufan. Breksi gunung api umumnya tersusun oleh andesit-basal, sering memperlihatkan penghalusan butiran ke atas dan berangsur berubah menjadi batupasir tufan kasar. Retas andesit memotong lapisan ini. Singkapan lava di Lapango terpiritkan di sepanjang retakan, pada tempat itu mengandung senolit basal. Sebagian runtunan breksi gunung api dan

tuf, keduanya dipotong oleh urat kuarsa mengandung emas. Satuan ini tebalnya lebih dari 500 m. **Batuan terobosan Diorit dan Andesit (Q_{ti, di, an})** stok dan retas diorit dan andesit keduanya menerobos batuan gunung api Sahendaruman. Terobosan andesit cukup besar terdapat di Gunung Arenkambing, dan diorit dijumpai di sekitar Lapango dan Soweang. Kegiatan ini menyebabkan pengersikan, penyilikan dan ubahan pada breksi dan tuf, serta pemineralan emas. Karena formasi Pintareng tidak dipengaruhi oleh terobosan. Kegiatan magmatik ini diduga terjadi pada akhir Plio-Plistosen, sebelum pengendapan sedimen klastika asal-gunung api.

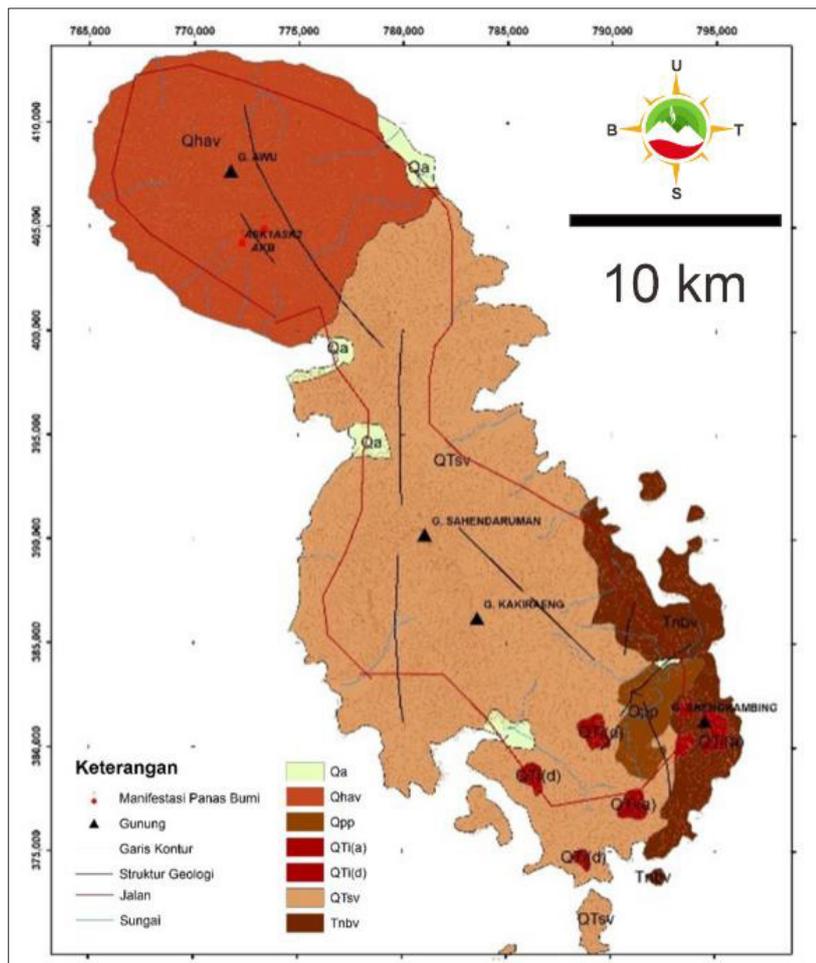
Formasi Pintareng (Q_{pp}) terdiri dari Konglomerat, pasir kerikilan, pasir, lanau dan lempung hitam, bersisipan tuf. Batuan sedimen kasar kaya kepingan batuan asal gunung api. Konglomerat di Sungai Pintareng mengandung fosil vertebrata jenis *Stegodon sp B, cf trigonocephalus*, yang diduga berumur Plistosen Akhir. Kepingan fosil yang ditemukan berupa geraham atas, tulang tumit, dan tulang jari, tulang rahang dan gading kanan. Kayu tersilika setempat dijumpai pada lapisan konglomerat yang sangat kasar. Pasir kerikilan secara berangsur berubah menjadi pasir kasar dan lanau. Lempung berwarna seragam dari hitam hingga agak kuning dengan kaolinan setempat dan mengandung lensa pasir kasar. Sebagian tuf bersifat pasiran.

Sebagai satuan berfasies darat (sungai terayam) tebalnya sekitar 100 meter. Stereotip satun ini terletak antara bagian hulu dan tengah sungai Pintareng.

Batuan Gunung Api Awu (Qhav) terdiri dari anglomerat, lava tuf, timbunan awan panas, endapan jatuhan dan lahar. Batuan dihaliskan oleh aktivitas Gunungapi Awu di Pulau Sangihe, yang letusannya berjenis sint Vincent dan vulkano. Lava bersusunan andesit yang terkekarkan meniang dan melembar juga bersumber dari beberapa kerucut parasit, misalnya gunung Tahuna. Endapan awan panas

meliputi daerah sekitar kawah, lembah dan beberapa pantai seperti Mitung dan Bahu. Daerah laharan meliputi lembah-lembah Laine, Kalekuba, Muade, Beha, Patung, Tonggoneha, Apendakile, Biwai, Pato, Sura, Maselihe, Sarukadel, Melebuhi-Akembala dan Kolongan.

Aluvium (Qav) berupa kerakal, kerikil, pasir dan lanau asal-gunungapi, lempung, lumpur dan kepingan koral. Merupakan endapan sungai, rawa dan pantai. Dataran aluvium yang luas terdapat di Tabukan Utara.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Daerah Panas Bumi Kabupaten Kepulauan Sangihe, Provinsi Sulawesi Utara (Modifikasi Samodra, 1994)

HASIL PENYELIDIKAN DAN ANALISIS

Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi sebagai indikasi keberadaan sistem panas bumi di daerah panas bumi Angges berada dalam wilayah Kelurahan Angges, Kecamatan Tahuna Barat, Kabupaten Kepulauan Sangihe. Daerah ini memiliki manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas yang tersebar di dua (2) lokasi berbeda, yaitu satu kelompok berada di Sungai Kadodo dan satu kelompok lainnya berada di Sungai Kokombie (Gambar 3). Kedua lokasi tersebut berada pada bagian tenggara-selatan dari lereng Gunungapi Awu.

1) Air Panas Kadodo

Air panas Kadodo memiliki beberapa mata air panas yang muncul dari rekahan breksi pada dinding Sungai Kadodo. Di lokasi ini teridentifikasi sebanyak delapan (8) mata air panas dengan temperatur 38,2-41,4°C. Setempat-setempat di sekitar mata airnya memiliki sinter silika tipis kurang dari 1 mm dan terlihat lumut berwarna hijau pada aliran air panasnya. Salah satu mata air panas Kadodo berada pada koordinat 774430 mT dan 404996 mU pada ketinggian 512 mdpl. Temperatur air panas terukur sebesar 41,4°C pada temperatur udara 27,4°C. Nilai pH sebesar 5,8, TDS sebesar 1066 ppm, serta daya hantar listrik sebesar 1603 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mata air panasnya memiliki debit sebesar 0,6 liter/detik,

terlihat jernih, tidak berasa, dan tidak berbau. Jika memperhatikan temperatur air panas yang kurang dari 50°C, maka dikategorikan sebagai mata air hangat.

2) Air Panas Kokombie

Air panas Kokombie muncul di Sungai Kokombie. Di lokasi tersebut terdapat 4 mata air panas dengan temperatur antara 39,5- 42,0°C. Mata air panas dengan temperatur tertinggi muncul dari bawah bongkah aluvium Sungai Kokombie, pada koordinat 773311 mT dan 404380 mU dengan ketinggian 426 mdpl. Air panas memiliki debit sebesar 0,3 liter/detik, temperatur air sebesar 42,0°C pada temperatur udara 25,8°C, nilai pH 6,2 dan TDS sebesar 879 ppm, serta daya hantar listrik sebesar 1318 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Air panas terlihat jernih, tidak berasa, dan tidak berbau.

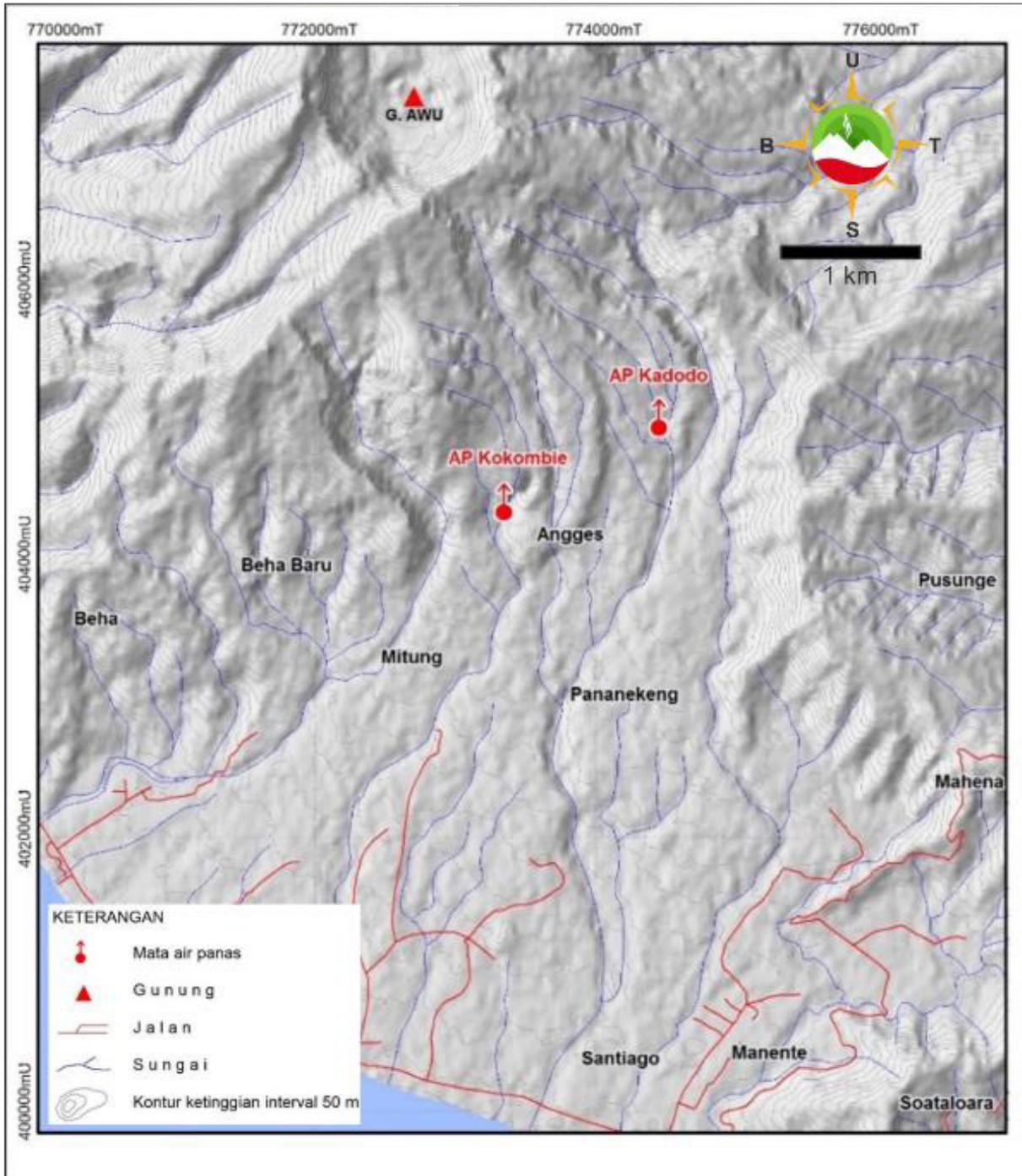
Penginderaan Jauh

Prinsip yang digunakan dalam pembuatan peta densitas kelurusan dengan metode *Fault and Fracture Density* (FFD), yaitu mengasumsikan kelurusan sebagai sesar dan rekahan merupakan bidang lemah untuk jalur pergerakan fluida panas. Data yang digunakan dalam pembuatan analisis densitas kelurusan berupa data citra Sentinel-1, untuk kemudian diekstrak menjadi *hillshade*. Setiap kelurusan yang terdapat dalam tiap *grid* dihitung jumlah kelurusan yang selanjutnya akan diinterpolasikan dengan *grid* lainnya, sehingga didapat suatu peta

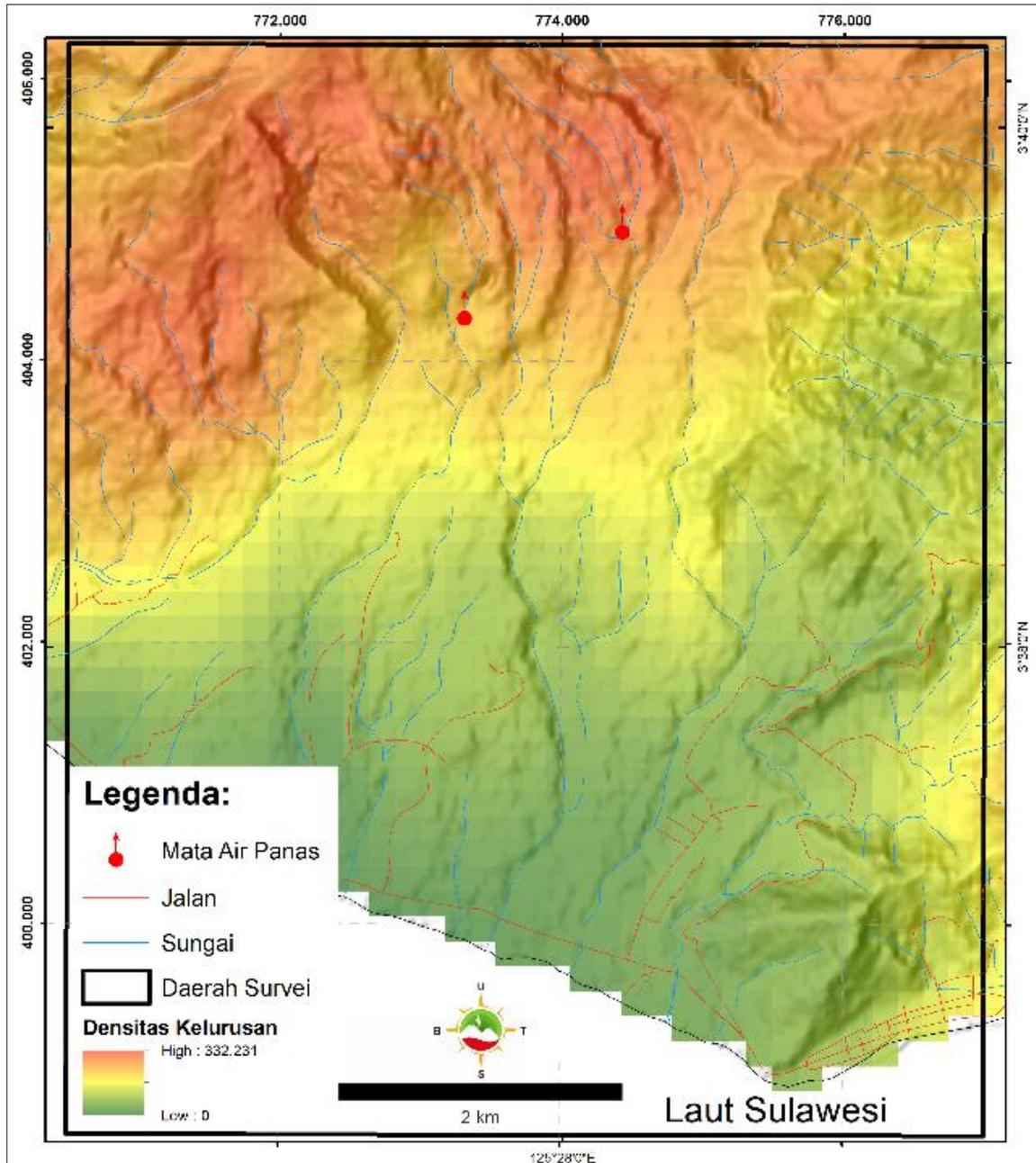
densitas kelurusan untuk menerjemahkan arah dan pola dari kelurusan di daerah panas bumi Angges.

Hasil analisis kerapatan kelurusan/*Fault and Fracture Density* (FFD) di daerah panas bumi Angges

memperlihatkan bahwa anomali kerapatan tinggi berada pada tubuh Gunungapi Awu (Gambar 4). Anomali FFD tinggi diharapkan menjadi zona permeabel bagi fluida baik sebagai daerah *recharge* maupun *discharge*.



Gambar 3. Peta Sebaran Manifestasi



Gambar 4. Peta FFD Daerah Panas Bumi Angges

Geomorfologi

Pembagian satuan geomorfologi daerah penyelidikan, dilakukan berdasarkan hasil studi dari klasifikasi geomorfologi yang dilakukan oleh Van Zuidam (1985). Dalam hal interpretasi geomorfologi, penulis menggunakan 3 aspek pendekatan, yaitu morfometri, morfografi, dan morfogenetik.

Van Zuidam (1985) telah membagi kelas relief berdasarkan kelerengan dan perbedaan ketinggian.. Warna-warna tertentu yang direkomendasikan untuk dijadikan simbol satuan geomorfologi berdasarkan aspek genetik adalah sebagai berikut (Tabel 1).

Tabel 1. Hubungan kelas relief, kemiringan lereng dan perbedaan ketinggian

Klasifikasi	Kemiringan		Beda Tinggi (m)	Warna
	Persen (%)	Derajat (°)		
Datar	0-2	0-2	< 5m	Hijau
Agak Landai	2-7	2-4	5 s.d. 25 m	Hijau Muda
Landai	7-15	4-8	25 s.d. 75 m	Kuning
Agak Curam	15-30	8-16	75 s.d. 200 m	Jingga
Curam	30-70	16-35	200 s.d. 500 m	Merah Muda
Terjal	70-140	35-55	500 s.d. 1000 m	Merah
Sangat Terjal	>140	>55	> 1000 m	Ungu

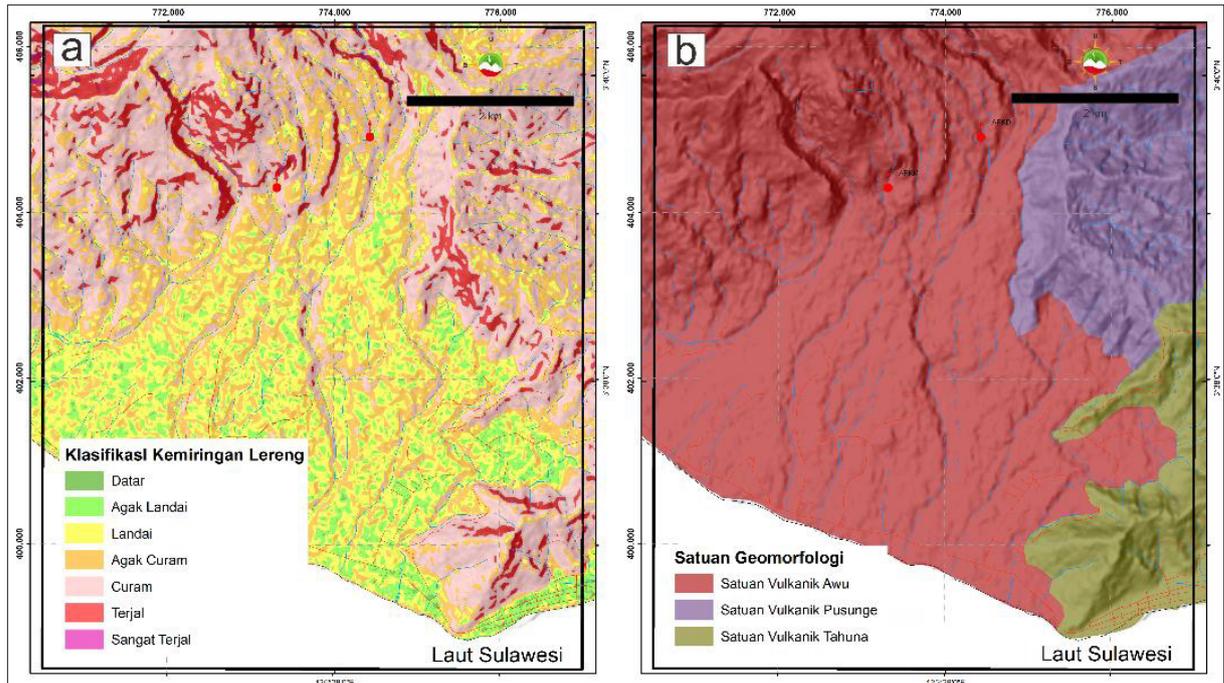
Berdasarkan hasil analisis kelerengan yang dilakukan menggunakan data kontur, sungai, dan DEM (*Digital Elevation Map*), daerah penyelidikan dapat diklasifikasikan menjadi empat kelas lereng (Gambar 5 (a)) berdasarkan van Zuidam (1985), yaitu:

1. Lereng dengan klasifikasi Datar dan Agak Landai ($0-2^\circ$ dan $2-4^\circ$) meliputi 8,8% dari luasan daerah penyelidikan
2. Lereng dengan klasifikasi Landai ($4-8^\circ$) meliputi 15,6% dari luasan daerah penyelidikan
3. Lereng dengan klasifikasi Agak Curam-Curam ($8-15^\circ$ dan $15-35^\circ$) meliputi 40% dari luasan daerah penyelidikan
4. Lereng dengan klasifikasi Terjal dan Sangat Terjal ($>35^\circ$) meliputi 4,9% dari daerah penyelidikan

Berdasarkan hasil analisis peta geomorfologi yang dilakukan menggunakan kombinasi data morfometri, morfografi dan morfogenesis, disimpulkan bahwa daerah penyelidikan yang berada di daerah penyelidikan diklasifikasikan menjadi 3 satuan geomorfologi secara

umum berdasarkan Van Zuidam.1983 (Gambar 5 (b)), yaitu:

1. **Satuan Geomorfologi Vulkanik Awu** menempati 70% daerah penyelidikan. Satuan ini terdiri dari lereng yang datar hingga sangat terjal. Satuan vulkanik Awu terbentuk karena adanya aktivitas Gunung Api Awu yang masih aktif. Secara umum satuan ini dimanfaatkan sebagai pemukiman, perkebunan dan hutan.
2. **Satuan Geomorfologi Vulkanik Pusunge** menempati 20% daerah penyelidikan. Satuan ini terdiri dari lereng yang datar hingga terjal. Satuan vulkanik Pusunge terbentuk karena adanya aktivitas Gunung Api Pusunge di masa lalu. Secara umum satuan ini dimanfaatkan sebagai pemukiman, perkebunan dan hutan.
3. **Satuan Geomorfologi Vulkanik Tahuna** menempati 10% daerah penyelidikan. Satuan ini terdiri dari lereng yang datar hingga sangat terjal. Satuan vulkanik Tahuna terbentuk karena adanya aktivitas Gunung Api Tahuna di masa lalu serta membentuk Teluk Tahuna. Secara umum satuan ini dimanfaatkan sebagai pemukiman, perkebunan dan hutan.



Gambar 5. (a) Peta Kemiringan Lereng dan (b) Peta Geomorfologi

Stratigrafi

Batuan di daerah panas bumi Angges secara umum disusun oleh batuan gunungapi yang merupakan produk aktivitas vulkanik gunungapi di Pulau Sangir. Satuan batuan di daerah penyelidikan dibagi berdasarkan sumber aktivitas vulkanismenya, sedangkan batas satuan diinterpretasikan berdasarkan pengamatan dari citra dan pola kontur. Satuan batuan di daerah survei dibagi menjadi tujuh (7) satuan batuan tidak resmi, dari tua ke muda, yaitu Satuan Batuan Gunungapi Tahuna, Satuan Batuan Gunungapi Pusunge, Satuan Lava Awu Tua, Satuan Piroklastik Awu Tua, Satuan Piroklastik Awu Muda, Satuan Lava Awu Muda, serta Aluvial dan Endapan Pantai. Seluruh satuan batuan di daerah penyelidikan terbentuk pada Periode Kuartar.

Satuan Batuan Gunungapi

Tahuna merupakan batuan tertua yang ada di daerah penyelidikan. Satuan ini tersusun atas batuan andesit-basaltik, berwarna abu-abu kecoklatan, afanitik dengan mineral penyusun berupa piroksen, hornblenda, plagioklas, K-felspar yang tertanam dalam masa dasar mineral mafik. Satuan ini menempati daerah tenggara daerah penyelidikan. Satuan ini telah terdeformasi ditandai dengan hadirnya kekar-kekar di singkapannya. Satuan ini merupakan produk Gunungapi Tahuna. Analisis petrografi didapatkan batuan berupa batuan andesit-basaltik. Hasil analisis XRF juga mendapatkan andesit-basaltik.

Satuan Batuan Gunungapi

Pusunge merupakan satuan batuan yang lebih muda daripada Satuan Batuan Gunungapi Tahuna. Satuan ini tersusun

atas batuan andesit, berwarna abu-abu, afanitik dengan mineral penyusun berupa hornblenda, plagioklas, K-felspar, dan kuarsa yang tertanam dalam masa dasar mineral mafik. Satuan ini menempati sebelah timur-timurlaut daerah penyelidikan. Satuan ini merupakan produk aktivitas Gunung Pusunge. Analisis petrografi pada batuan didapatkan batuan berupa batuan andesit-basaltik. Hasil analisis XRF pada juga mendapatkan andesit-basaltik.

Satuan Lava Awu Tua merupakan batuan yang terbentuk oleh aktivitas Gunung Awu pada awal periode pembentukannya. Satuan Lava Awu Tua tersusun oleh batuan andesit. Satuan ini dapat ditemukan di sebelah baratlaut, baratdaya dan timur dari tubuh Gunung Awu. Analisis petrografi pada satuan ini didapatkan klasifikasi andesit-basaltik pada sampel, sedangkan analisis XRF mendapatkan jenis batuan andesit-basaltik.

Satuan Piroklastik Awu Tua merupakan satuan yang juga terbentuk oleh aktivitas Gunung Awu Tua. Satuan ini tersusun oleh tuf yang persebarannya dapat ditemukan di sebelah barat tubuh Gunung Awu.

Satuan Piroklastik Awu Muda merupakan satuan batuan yang terbentuk akibat aktivitas Gunung Awu Muda. Satuan ini terbentuk oleh endapan piroklastik aliran yang merupakan produk letusan Gunung Awu pada tahun 1966. Satuan Piroklastik

Awu tersusun atas breksi vulkanik di bagian bawah, berwarna kecoklatan keabuan, ukuran butir blok-debu, menyudut-menyudut tanggung, kemas terbuka, *graded bedding*, fragmen andesit, skoria. Sedangkan di bagian atas tersusun atas tuf, berwarna abu-abu kecoklatan, ukuran butir debu, setempat ditemukan bekas batang pohon yang hangus akibat erupsi. Analisis petrografi pada didapatkan batuan berupa batuan tuf kristal. Satuan ini mengisi celah lembah antara Gunung Awu dengan Gunung Tahuna.

Satuan Lava Awu Muda merupakan satuan batuan yang lebih muda. Satuan ini tersusun atas andesit, andesit hornblenda, serta breksi vulkanik. Satuan ini menempati bagian barat, tengah hingga timur dari tubuh Gunung Awu. Satuan ini merupakan produk aktivitas Gunungapi Awu yang masih aktif. Aktivitas terakhir dari Gunungapi Awu tercatat pada tahun 2004 (Badan Geologi, 2011). Aktivitas Gunung Awu inilah yang diduga merupakan sumber panas dari aktivitas kepanasbumian di daerah panas bumi Angges. Analisis petrografi pada sampel batuan didapatkan nama batuan andesit. Analisis XRF menunjukkan bahwa sampel merupakan batuan andesit.

Aluvial dan Endapan Pantai merupakan satuan termuda. Satuan ini tersusun atas pasir hingga bongkah lepas-lepas. Sebarannya berada di sekitar Teluk Tahuna. Seluruh satuan batuan batuan di-

overlay-kan dengan manifestasi dan struktur geologi tersaji pada **Gambar 7**.

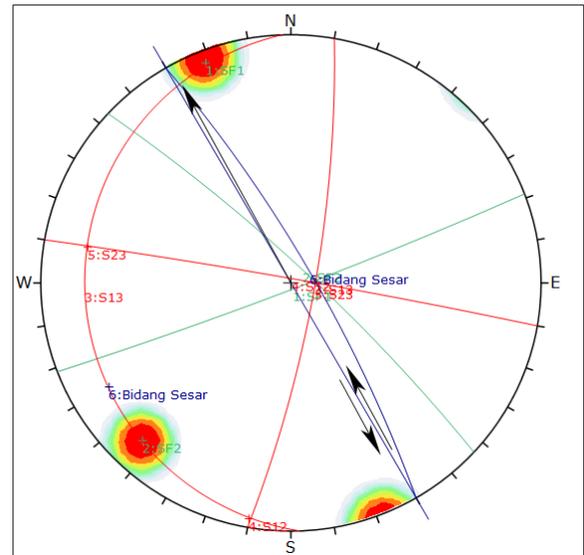
Struktur Geologi

Struktur geologi daerah panas bumi Angges pada umumnya merupakan sesar yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik. Struktur-struktur tersebut berupa kaldera gunungapi tua, kawah, dan kelurusan vulkanik. Di sebelah tenggara daerah penyelidikan teramati adanya **Kaldera Gunung Tahuna** yang dapat diamati dari punggung melingkar yang membentuk Teluk Tahuna.

Kaldera Gunung Pusunge di sebelah timurlaut juga dapat diamati dari punggung melingkar. Kaldera ini merupakan kaldera dari Gunung Pusunge.

Sesar Kokombia di tengah daerah penyelidikan dapat diamati dari kelurusan sungai dan kehadiran kekar gerus. Sesar ini memiliki kelurusan berarah relatif baratlaut-tenggara. Berdasarkan analisis kinematika (**Gambar 6**), sesar ini merupakan sesar manganan turun. Di sebelah tenggara sesar ini tertimbun oleh material Gunungapi Awu Muda. Sesar ini bersama dengan Sesar Beha merupakan pengontrol munculnya air panas di daerah penyelidikan.

Sesar Kandahe I berada di sebelah baratlaut daerah penyelidikan. Sesar ini diinterpretasikan berdasarkan kelurusan punggung di lereng selatan Gunung Awu. Sesar ini diinterpretasikan sebagai sebuah sesar normal.



Gambar 6. Analisis Kinematika Sesar Kokombia

Sesar Kandahe II berada di sebelah barat daerah tubuh Gunung Awu. Sesar ini diinterpretasikan berdasarkan kelurusan punggung. Sesar ini diperkirakan merupakan sesar normal. Sesar ini bersama Sesar Kandahe I membentuk suatu depresi yang di tengahnya dialiri oleh lava awu muda.

Sesar Pananekeng di sebelah utara daerah penyelidikan dapat diamati dari bentukan gawir tegak. Sesar ini diinterpretasikan sebuah sesar normal yang memotong Gunungapi Awu tua. Pada *hanging wall*-nya diisi oleh material Gunungapi Awu Muda.

Sesar Angges berada di sebelah utara daerah penyelidikan, di lereng timur Gunungapi Awu. Sesar ini dapat diamati dari bentukan gawir. Sesar ini merupakan suatu sesar turun dengan *hanging wall* berada di sebelah timur.

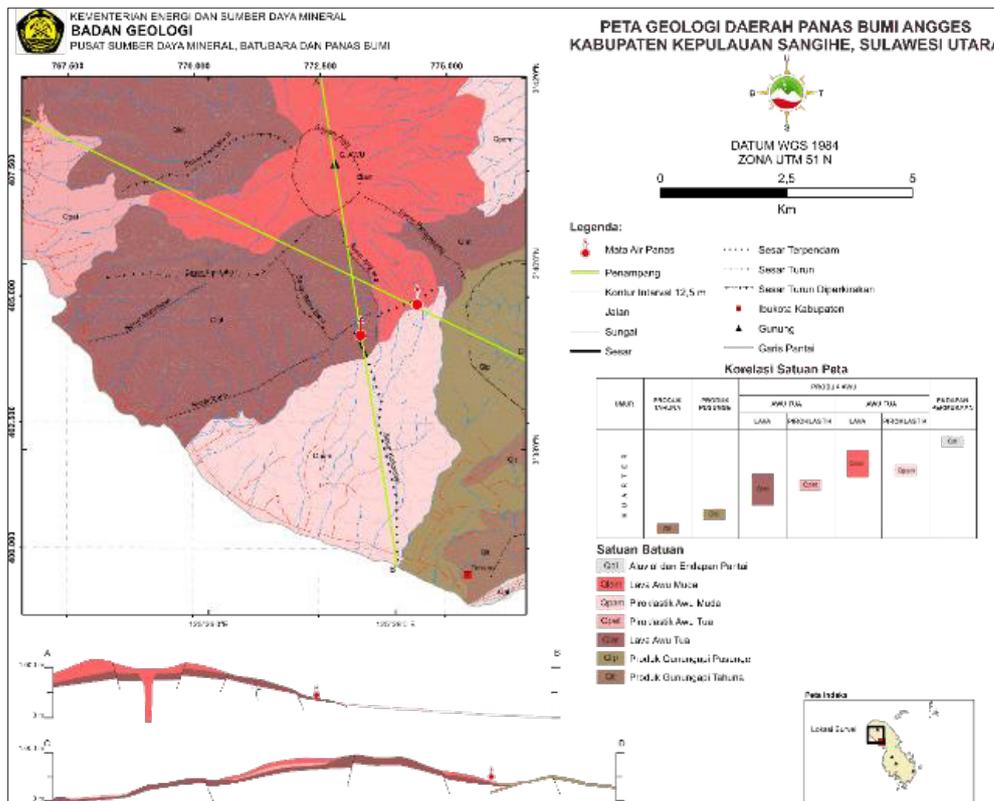
Sesar Beha Baru berada di tengah daerah penyelidikan, di lereng timur Gunungapi Awu. Sesar ini dapat diamati dari bentukan gawir. Sesar ini merupakan suatu sesar turun dengan *hanging wall* berada di sebelah timur.

Sesar Beha memanjang dari barat hingga tengah dengan orientasi baratdaya-timurlaut. Sesar ini diamati berdasarkan kelurusan morfologi serta beberapa air terjun di daerah penyelidikan. Sesar ini merupakan suatu sesar normal dengan *hanging wall* berada di sebelah selatan bidang sesar. Sesar ini bersama dengan Sesar Kokombia merupakan pengontrol munculnya air panas di daerah penyelidikan.

Dijumpai adanya kelurusan vulkanik berarah N 150° E, diduga merupakan kelurusan titik erupsi gunungapi yang terdapat di Pulau Sangir, seperti Gunung Tahuna, Gunung Posong (Pusunge) dan Gunung Awu (Sasongko, dkk. 1995 dalam Badan Geologi, 2011).

Analisis Geokimia Unsur Terlarut

Air panas Kadodo secara umum memiliki nilai konsentrasi unsur terlarut lebih tinggi jika dibandingkan dengan air panas Kokombie. Hanya konsentrasi HCO₃ pada air panas Kokombie yang relatif lebih tinggi dari air panas Kadodo. Hal ini diduga berhubungan dengan pengaruh percampuran air panas oleh air meteorik pada air panas Kokombie yang hadir pada elevasi lebih rendah.



Gambar 7. Peta Geologi Daerah Panas Bumi Angges

Tabel 2. Hasil analisis kimia anion-kation sampel air Daerah Sangihe

NAMA SAMPEL (KODE)		Air Panas Kadodo (APKD)	Air Panas Kokombie (APKM)	Air Dingin Santiago (ADSN)	Air Laut Sangihe (ALS)
pH		5,80	6,20	6,80	8,00
DHL	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1603	1318	146	34200
TDS	(ppm)	1668	1260	160	34320
SiO ₂	(mg/L)	140,62	122,35	92,27	10,78
B	(mg/L)	2,92	1,56	0,54	4,04
Al ³⁺	(mg/L)	0,07	0,07	0,06	0,11
Fe ³⁺	(mg/L)	0,05	0,19	0,17	2,61
Ca ²⁺	(mg/L)	150,45	102,23	14,21	382,03
Mg ²⁺	(mg/L)	71,70	49,64	5,25	935,07
Na ⁺	(mg/L)	135,61	110,50	11,38	9142,00
K ⁺	(mg/L)	35,80	25,14	3,08	358,20
Li ⁺	(mg/L)	0,14	0,02	0,00	0,08
As ³⁺	(mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00
NH ₄ ⁺	(mg/L)	0,45	0,42	0,46	0,86
F ⁻	(mg/L)	0,35	0,00	0,00	1,03
Cl ⁻	(mg/L)	256,49	213,67	1,61	15772,83
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	595,73	399,65	6,16	2453,97
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	72,88	85,45	95,75	128,36
CO ₃ ⁼	(mg/L)	0,00	0,00	0,00	17,64
Charge Balance (%)		1,4	3,5	0,4	0,4

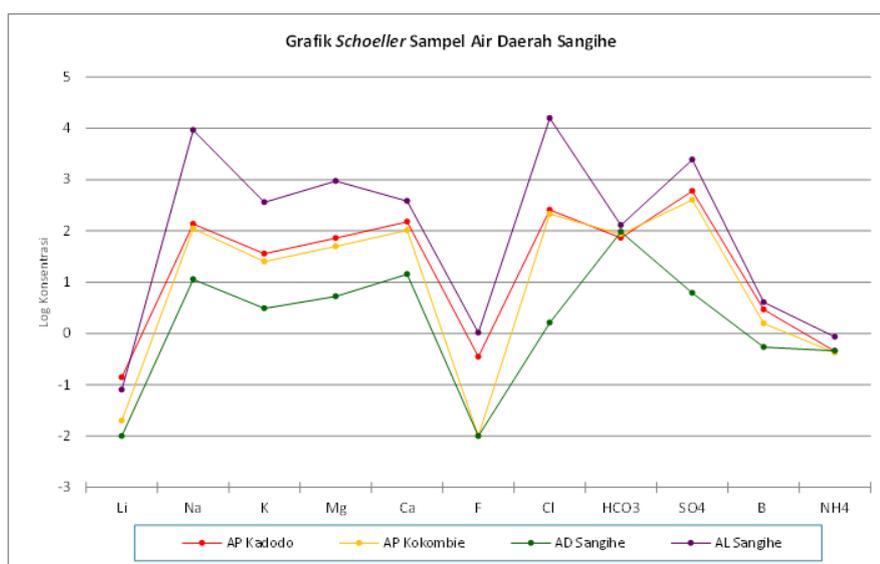
Air panas diduga berasal air meteorik yang terpanaskan oleh uap panas (*steam heated water*), membentuk fluida di area kawah dengan pH relatif asam. Fluida panas tersebut kemudian mengalir ke elevasi lebih rendah di bagian selatan kawah Gunung Awu melalui celah bukaan kawahnya yang terbuka ke bagian selatan. Fluida panas dalam perjalanannya menuju permukaan dapat mengalami proses interaksi dengan batuan sampling yang dilewatinya, juga proses pencampuran (*mixing*) dengan fluida lain, misalnya air permukaan atau air meteorik. Interaksi mineral penyusun batuan dengan mineral yang terkandung pada fluida panas bumi dapat menghasilkan komposisi dan konsentrasi anion dan kation baru yang berbeda dengan fluida di tempat asalnya.

Peristiwa lain berupa pencampuran fluida panas dengan air meteorik mengakibatkan pengenceran fluida panasnya dan dapat mengubah konsentrasi anion kation tertentu. Tingginya konsentrasi silika (SiO₂) pada kedua air panas diperkirakan sebagai hasil interaksi batuan beku magmatik kaya silika dengan fluida panas pada temperatur tinggi di area kawah Gunung Awu. Tingginya konsentrasi Mg pada kedua air panas pun selain adanya faktor pengaruh konsentrasi Mg relatif tinggi pada air meteorik, mungkin berasal dari batuan teralterasi kaya mineral klorit yang banyak terdapat di sekitar kawah Gunung Awu. Menurut Nicholson (1993), komposisi Mg pada fluida panas bumi pada umumnya sangat rendah, yaitu antara 0,01 sampai 0,1 mg/L. Nilai Mg yang tinggi dapat

berasal dari batuan kaya alterasi klorit maupun batuan kaya Mg yang berinteraksi dengan fluida saat mengalir ke permukaan. Namun unsur Mg pada fluida panas juga dapat disebabkan oleh kontaminasi dengan fluida meteorik (Giggenbach, 1988; Reyes, et. al., 2010). Pengaruh air meteorik pada fluida panas bumi umumnya terlihat pada relatif lebih tingginya konsentrasi Ca, Mg, dan HCO₃, meskipun Ca dan HCO₃ dapat juga berasal dari batuan sedimen atau metamorf yang sumbernya berasal dari batuan sedimen (Belhai et al, 2016; Mutlu dan Güleç, 1998).

Hubungan beberapa sampel air berdasarkan konsentrasi anion dan kationnya terlihat pada Diagram Schoeller (Gambar 8). Pada diagram tersebut terlihat ada 3 air dengan pola konsentrasi yang berbeda. Pola konsentrasi pertama berupa air laut Sangihe (ALS) yang memiliki pola konsentrasi lebih tinggi dari air dingin dan

air panas, kecuali Li yang sedikit lebih rendah dari air panas. Pola konsentrasi kedua adalah air panas Kadodo dan air panas Kokombie dengan pola konsentrasi lebih tinggi dari air dingin, tetapi lebih rendah dari konsentrasi air laut. Pola konsentrasi air dingin yang diwakili air dingin Santiago (ADSN) merupakan pola konsentrasi ketiga yang memiliki konsentrasi lebih rendah dari air laut dan air panas. Jika memperhatikan perbandingan pola konsentrasi ketiga kelompok air tersebut, pola konsentrasi air panas terlihat lebih memiliki kemiripan dengan pola konsentrasinya air dingin Santiago. Perbedaan terlihat signifikan pada nilai konsentrasinya saja. Dengan demikian, diduga terdapat hubungan antara air meteorik di Sangihe terhadap air panas. Adapun Mg air panas yang relatif tinggi diperkirakan akibat pengkayaan dari batuan ubahan mengandung mineral klorit.



Gambar 8. Pola konsentrasi anion kation air panas, air laut, dan air meteorik di Daerah Sangihe pada Grafik Schoeller

Tipe Fluida

Konsentrasi anion air panas Kadodo dan Kokombie pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 9 (a)) menempatkan sampel air tersebut ke dalam air panas bertipe asam sulfat dari air gunungapi (*volcanic waters*). Rasio Cl/HCO₃ dan rasio SO₄/HCO₃ yang besar, yaitu 3,5 dan 8,2. Air bertipe klorida-asam sulfat (Cl-SO₄) pada lingkungan gunungapi terbentuk sebagai akibat dari kondensasi unsur volatil magmatik menjadi fase cair. Tipe air tersebut terbentuk pada bagian paling dangkal, sebagai akibat kondensasi uap air ke dalam air permukaan. Pada lokasi pembentukan air tersebut umumnya terjadi proses pelarutan batuan sekitar yang intensif, berhubungan dengan sifat fluidanya yang asam dan temperatur yang lebih tinggi. Konsentrasi sulfat yang tinggi sebagai akibat dari proses oksidasi H₂S di zona oksidasi menghasilkan H₂SO₄.

Geoindikator

Diagram segi tiga Cl-Li-B (Gambar 9 (b)) menunjukkan bahwa air panas Kadodo dan Kokombie berada satu kluster pada zona Li loss atau absorpsi B dan Cl oleh batuan, menuju pojok Cl. Fluida panas buminya diperkirakan bergerak cukup jauh dari reservoir di kedalaman atau sejalan dengan berkurangnya konsentrasi Li dan bertambahnya konsentrasi Cl, pada kedalaman yang lebih dangkal kemungkinan mengalami proses pencampuran dengan air permukaan.

Kedua air panas terplot semakin menjauh dari pojok Li dan mendekati ke pojok Cl sebagai indikasi terjadinya pergerakan lateral fluida panas yang berinteraksi dengan air permukaan. Air panas Kokombie yang terplot semakin menjauh dari pojok Li, memiliki rasio C/Li menjadi semakin besar mencapai 10.863, sedangkan air panas Kadodo hanya 1832. Hal tersebut kemungkinan berhubungan dengan pergerakan lateral air panas Kokombie yang lebih jauh dari pada air panas Kadodo. Oleh karena hal tersebut, diperkirakan bahwa kedua air panas telah mengalami pergerakan secara lateral dari arah kawah Gunungapi Awu atau dapat diduga sebagai *outflow* dari sistem panas bumi di Gunungapi Awu, bahkan mungkin hanya hasil aliran lateral fluida panas dari sistem gunungapi aktif saja. Kondisi air panas dalam segi tiga Cl-Li-B yang berada dalam satu kluster, jika di sekitar Gunungapi Awu sudah terbentuk sistem panas bumi, diperkirakan sebagai indikasi adanya kesamaan asal air reservoir panas bumi.

Kesetimbangan Fluida

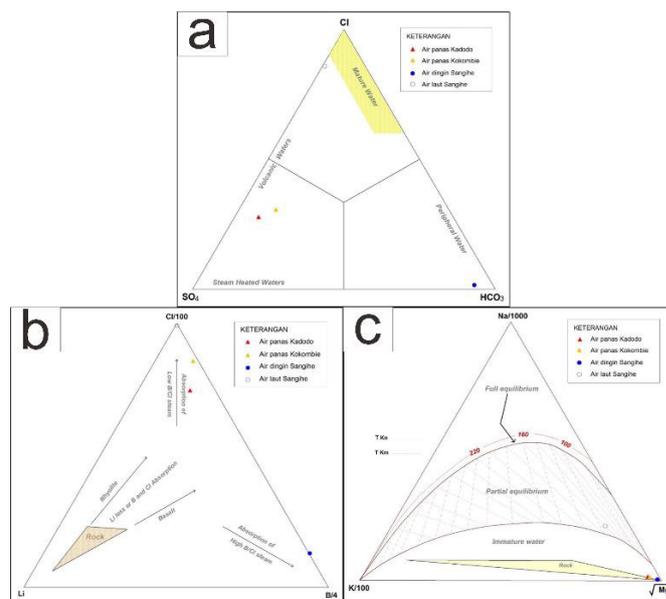
Diagram segi tiga Na, K, dan Mg (Gambar 9 (c)) memperlihatkan bahwa air panas Kadodo dan Kokombie termasuk ke dalam klasifikasi *immature waters*. Kedua air panas tersebut diperkirakan tidak mengalami proses kesetimbangan, interaksi antara fluida panas dengan batuan tidak berlangsung intensif. Pada kondisi tersebut fluida panas lebih banyak

berinteraksi dengan air meteorik, sehingga konsentrasi unsur Mg menjadi lebih tinggi. Ketika fluida panas bergerak semakin mendekati permukaan, maka kontaminasi dari unsur Mg akan semakin besar.

Isotop Stabil

Analisis isotop stabil berupa isotop oksigen-18 (¹⁸O) dan deuterium (²H) dilakukan terhadap 10 sampel air dari daerah panas bumi Sangihe. Hasil analisis isotop oksigen-18 dan deuterium terlihat pada **Tabel 3**. Kandungan isotop oksigen-18 dan deuterium dalam semua sampel air panas Sangihe tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan sampel air dinginnya. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara fluida panas bumi dengan batuan tidak terlalu intensif dan hampir semua air panas berhubungan dengan air meteorik.

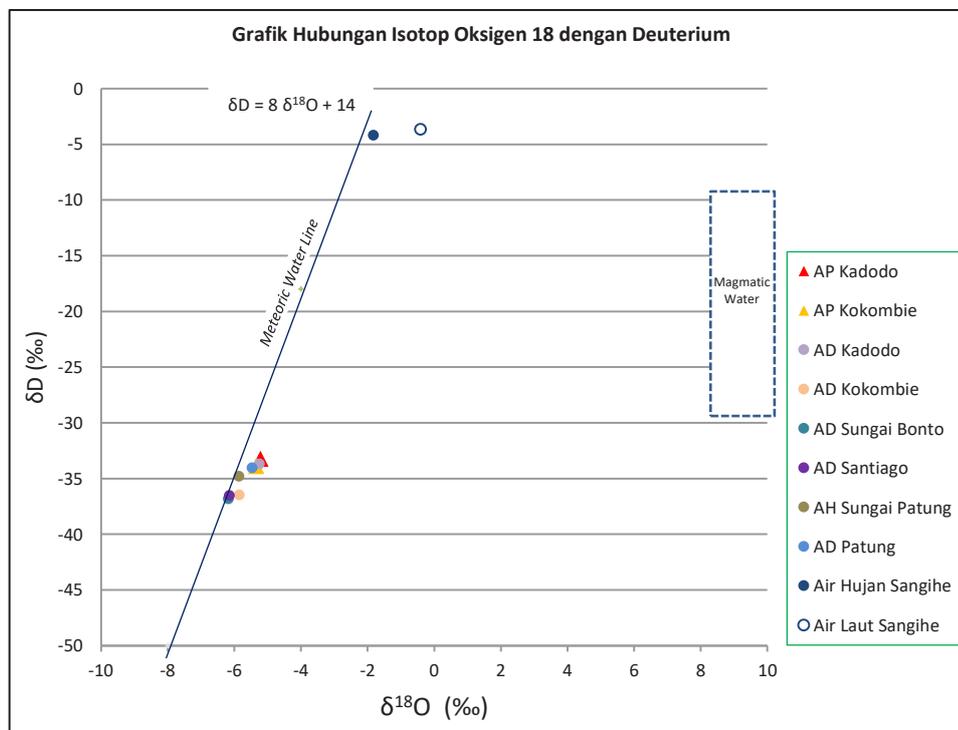
Pada grafik hubungan antara isotop oksigen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) dan deuterium ($\delta^2\text{H}$) dengan persamaan air meteorik lokal (*meteoric water line*) $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 14$, semua air panasnya sedikit berada di bagian kanan garis persamaan air meteorik lokal dan sedikit bergeser ke bagian atas dari kelompok sampel air dingin (Gambar 10). Hasil analisis isotop menunjukkan bahwa sampel air panas mengalami sedikit pergeseran atau pengkayaan oksigen-18 maupun deuteriumnya. Pegeseran isotop $\delta^{18}\text{O}$ air panas di daerah Sangihe sangat kecil, jauh di bawah 3,5‰, sehingga interaksi antara fluida panas dan batuan tidak intensif seperti halnya pada fluida temperatur tinggi. Dengan tingkat evaporasi yang sangat kecil, maka proses pengkayaan pun sangat kecil. Oleh karena hal tersebut, maka air panas Kadodo dan Kokombie diperkirakan lebih berhubungan dengan air meteorik.



Gambar 9. Diagram segitiga (a) Tipe Fluida (b) Geoindikator (c) Kesetimbangan Fluida

Tabel 3. Hasil Analisis Kandungan Isotop Oksigen-18 dan Deuterium

NAMA SAMPEL	KODE SAMPEL	OKSIGEN-18	DEUTERIUM
		($\delta^{18}\text{O}$) (‰)	(δD) (‰)
Air Panas Kadodo	APKD	-5,21	-33,23
Air Panas Kokombie	APKM	-5,34	-33,85
Air Dingin Kadodo	ADKD	-5,24	-33,68
Air Dingin Kokombie	ADKM	-5,85	-36,46
Air Dingin Sungai Bonto	ADSB	-6,18	-36,82
Air Dingin Santiago	ADSN	-6,15	-36,53
Air Dingin Sungai Patung	AHPT	-5,86	-34,81
Air Dingin Patung	ADPT	-5,47	-34,05
Air Hujan Sangihe	AHS	-1,82	-4,18
Air Laut Sangihe	ALS	-0,42	-3,67



Gambar 10. Grafik isotop $\delta^{18}\text{O}$ terhadap $\delta^2\text{H}$ sampel air daerah Sangihe

Geotermometer

Geotermometer unsur terlarut yang digunakan dalam perhitungan ini adalah geotermometer silika. Geotermometer silika yang digunakan adalah geotermometer kuarsa konduktif. Hasil perhitungan berdasarkan geotermometer kuarsa tersebut adalah berkisar antara 150°C hingga 160°C.

Analisis Tanah dan Udara Tanah

Survei tanah dan udara tanah dilakukan pada 50 titik amat Pada lokasi lobang tersebut dilakukan pengukuran temperatur udara dan temperatur lubang, pengambilan sampel tanah untuk analisis pH dan kandungan unsur merkuri (Hg), dan pengambilan sampel gas CO₂.

Data hasil pengukuran temperatur pada lobang dengan kedalaman sekitar 1 meter selanjutnya dilakukan perhitungan secara statistika. Hasil perhitungan tersebut menghasilkan nilai rata-rata, nilai latar (*background*) dan nilai ambang (*threshold*).

1) Temperatur Udara Tanah

Temperatur udara tanah terendah yang terukur sebesar 23,5 °C dan tertinggi 29,6 °C, nilai rata-rata sebesar 26,5 °C, nilai latar (*background*) sebesar 27,9 °C, dan nilai ambang (*threshold*) sebesar 29,3 °C. Nilai temperatur lebih tinggi umumnya berhubungan dengan cuaca panas saat dilakukan pengukuran (**Gambar 11** (a)).

2) pH Tanah

Nilai pH memiliki nilai antara 6,0 hingga 8,2. Nilai *background* 6,7 dan nilai *threshold* 6,2, serta nilai rata-rata sebesar 7,1. Peta distribusi pH tanah (**Gambar 11** (b)) memperlihatkan lokasi yang memiliki nilai anomali rendah adalah di bagian selatan dan bagian tenggara. Pola sebaran nilai pH tanah diperkirakan tidak memiliki korelasi dengan keberadaan sistem panas bumi. Adapun nilai anomali pH rendah kemungkinan dipengaruhi oleh aktivitas perkebunan.

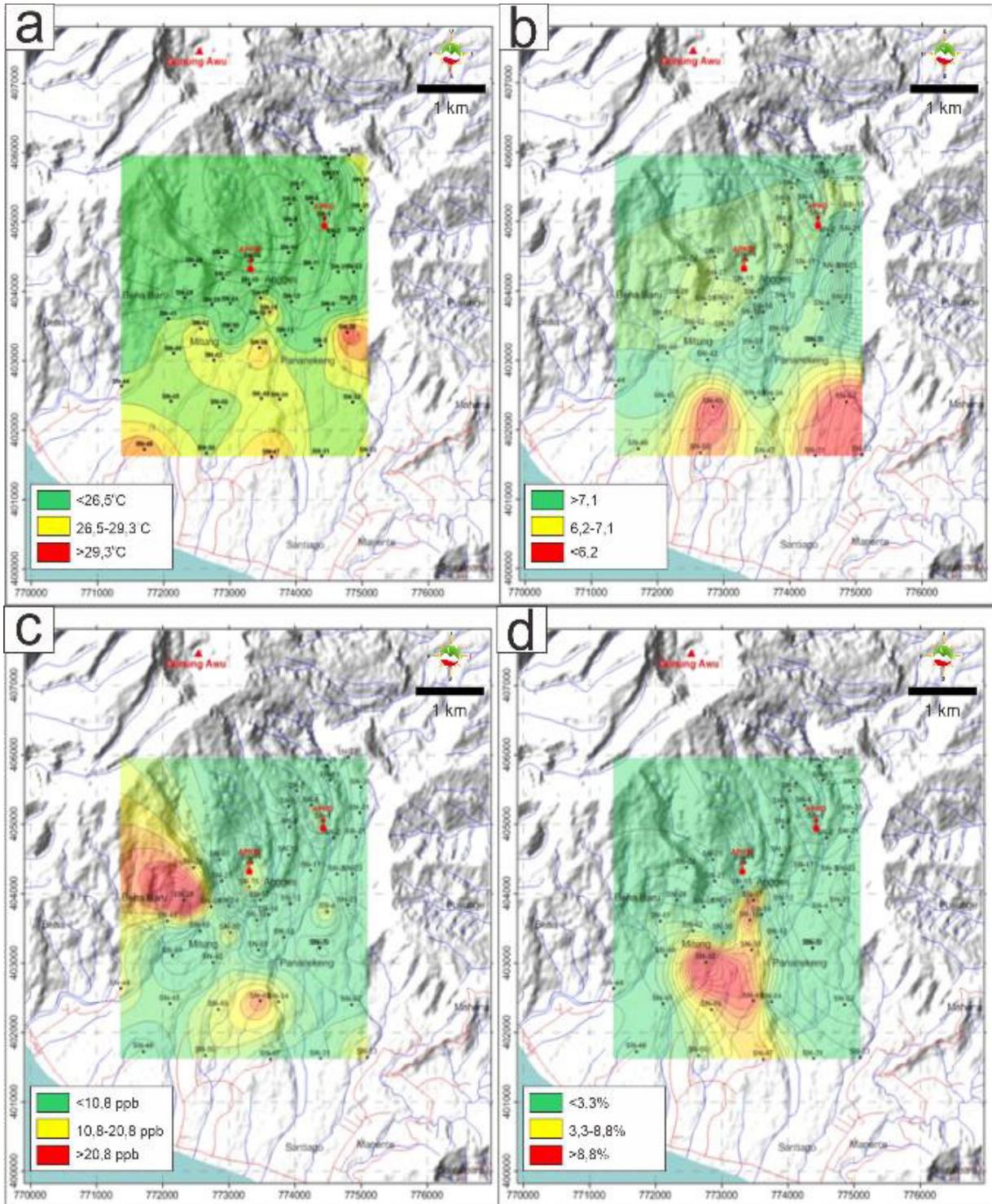
3) Hg Tanah

Konsentrasi merkuri tanah di Daerah Angges umumnya rendah hingga cukup tinggi setelah dikoreksi oleh nilai

konsentrasi H_2O^- . Variasi nilai konsentrasi Hg mulai 4,0 ppb sampai dengan 32,4 ppb. Variasi Hg tanah memberikan nilai *background* 15,8 ppb, nilai *threshold* 20,8 ppb, dan nilai rata-rata 10,8 ppb. Konsentrasi Hg tinggi terdapat di bagian barat dan di sebelah selatan mata air panas Kokombia (**Gambar 11** (c)). Nilai anomali Hg tinggi di kedua lokasi tersebut diperkirakan tidak berasosiasi dengan kehadiran sistem panas bumi. Pola anomali Hg tinggi di bagian timur-tenggara diduga berhubungan dengan kehadiran struktur sesar di bawahnya.

4) CO₂ Tanah

Konsentrasi karbondioksida (CO₂) dalam udara tanah umumnya sangat rendah, konsentrasi rata-ratanya sebesar 3,3% dengan konsentrasi tertinggi sebesar 12,8% dan terendah 0,33%. Konsentrasi gas CO₂ udara tanah memberikan nilai *background* 6,1% dan nilai *threshold* 8,8%. Peta distribusi nilai CO₂ udara tanah (**Gambar 11** (d)) memperlihatkan keterdapatan anomali tinggi konsentrasi CO₂ berada di bagian selatan dari mata air panas Kokombie, sedikit melebar ke arah baratdaya. Anomali CO₂ tinggi di sekitar mata air panas tersebut diduga memiliki korelasi dengan keberadaan zona dengan permeabilitas yang lebih baik yang diduga berasosiasi dengan kehadiran struktur berorientasi utara-selatan.



Gambar 11. Peta Sebaran (a) Temperatur Udara Tanah (b) pH Tanah (c) Hg Tanah, dan (d) CO₂ Tanah

PEMBAHASAN

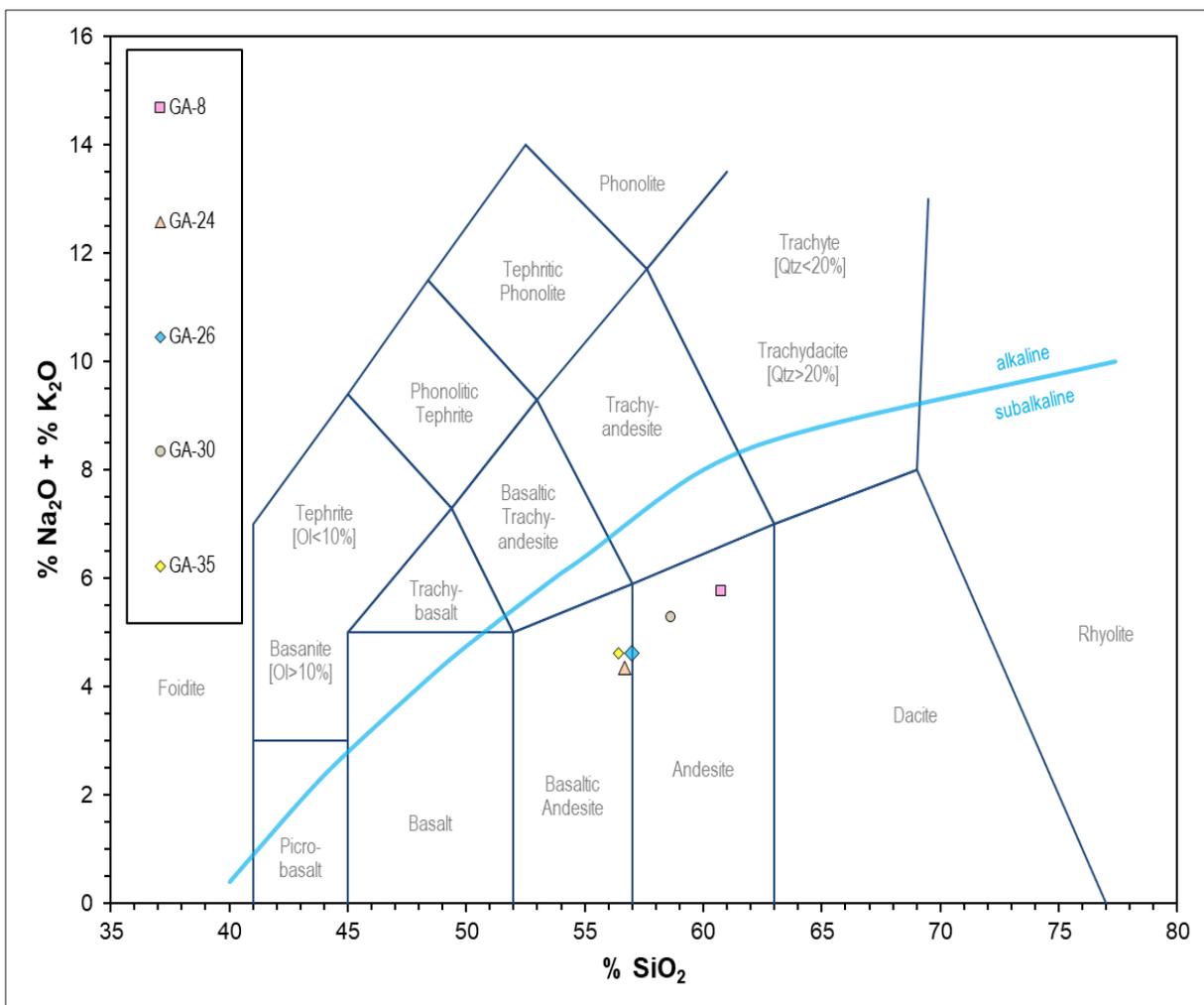
Secara umum, batuan di daerah panas bumi Angges tersusun atas batuan berkomposisi andesitis hingga andesit-

basaltik (Gambar 12). Berdasarkan Gambar 12 terlihat bahwa komposisi silika dari Gunungapi Tahuna, Gunungapi Pusunge, Gunungapi Awu Tua, dan Gunungapi Awu

Muda memperlihatkan kecenderungan evolusi dari basa ke intermedier. Hartono (1994) menjelaskan bahwa batuan yang terbentuk di daerah busur kepulauan merupakan batuan basaltik-andesitik, sedangkan batuan yang terbentuk pada daerah tepian kontinen aktif berupa batuan asam seperti dasit dan riolit. Hal tersebut sesuai dengan tatanan tektonik kepulauan Sangihe terletak pada zona subduksi di utara Pulau Sulawesi.

Tatanan geologi daerah panas bumi Angges berada pada lingkungan vulkanik. Daerah panas bumi Angges

berada di sebelah timur Gunungapi Awu yang masih aktif (tipe A). Aktivitas vulkanik berupa erupsi magmatik terakhir kali tercatat pada tahun 2004 yang membentuk kubah lava baru di kawah Gunungapi Awu. Struktur geologi berupa sesar normal diperkirakan membentuk suatu zona lemah yang memiliki permeabilitas yang baik sebagai reservoir panas bumi. Sesar normal Beha berperan dalam mengontrol keluarnya fluida panas dari reservoir panas bumi menuju ke permukaan sebagai manifestasi.



Gambar 12. Diagram Hubungan SiO₂ dengan Na₂O+K₂O

Sistem Panas Bumi

Aktivitas tektonik yang masih berlangsung hingga sekarang juga menghasilkan struktur-struktur berupa sesar geser maupun sesar normal. Struktur tersebut menghasilkan rekahan-rekahan di batuan yang membuat permeabilitasnya tinggi.

Aktivitas vulkanisme Gunung Awu merupakan sumber panas yang sangat baik untuk suatu sistem panas bumi di daerah panas bumi Angges. Rekahan yang terdapat pada batuan di sekitar Gunung Awu membentuk suatu permeabilitas yang baik untuk reservoir panas bumi. Sementara itu lapisan penudung tidak ditemukan singkapannya di lapangan,

Fluida panas diperkirakan memiliki tingkat interaksi dengan batuan yang cukup intensif. Bahkan nilai TDS yang cukup tinggi jika dibandingkan air dingin, mengindikasikan tingkat interaksi fluida panas dengan batuan cukup signifikan. Hal ini diharapkan bahwa fluida panas semula memiliki temperatur tinggi, berasosiasi dengan fluida magmatik pada Gunung Awu, namun pada bagian akhir dari perjalanannya di mata air panas Kadodo dan air panas Kokombie telah banyak mengalami pencampuran dengan air permukaan atau air meteorik, sehingga mengakibatkan temperatur fluidanya menjadi lebih rendah, bahkan konsentrasi anion-kationnya pun menjadi lebih rendah. Pola konsentrasi anion dan kation air panas yang lebih tinggi dari air dingin, namun

lebih rendah dari konsentrasi air laut mengindikasikan bahwa air panas memiliki hubungan erat dengan air dingin atau air meteorik. Hal ini terindikasi juga pada analisis isotop stabil oksigen-18 dan deuterium yang menunjukkan bahwa air panas tidak mengalami pengkayaan oksigen-18 dan deuterium secara signifikan, melainkan cenderung hampir sama dengan air dingin.

Air panas yang bertipe sulfat dengan konsentrasi klorida cukup signifikan diperkirakan berasal dari air klorida-sulfat ber-pH lebih rendah (asam) di kawah Gunung Awu pada elevasi yang jauh lebih tinggi dari elevasi mata air panas Kadodo dan Kokombie. Fluida tersebut dapat berasal dari air panas dalam sistem vulkanik atau air permukaan yang terpanaskan oleh uap panas pada topografi lebih tinggi di sekitar kawah, kemudian mengalir mengikuti topografi atau mungkin juga kontrol struktur patahan menuju topografi lebih rendah menghasilkan air panas di Sungai Kadodo dan di Sungai Kokombie.

Ketika air panas mengalir ke elevasi yang lebih rendah dari bagian kawah Gunung Awu, bersamaan dengan air meteorik, air tersebut tidak mampu untuk menembus lapisan yang lebih dalam. Hal ini disebabkan adanya lapisan impermeabel di bagian bawahnya yang posisinya lebih tinggi daripada muka air tanah (pizometrik). Air tersebut kemudian muncul ke permukaan sebagai mata air panas sulfat

dan relatif masih asam pada elevasi lebih rendah pada zona pertemuan muka air tanah. Selama perjalanan dari area kawah Gunungapi Awu hingga sampai di air panas Kadodo dan air panas Kokombie, fluida panasnya kemungkinan berinteraksi dengan batuan samping ataupun mengalami proses pencampuran (*mixing*) dengan air permukaan, sehingga diperkirakan akan menghasilkan karakteristik air panas yang baru. Air panas yang semula memiliki konsentrasi klorida dan sulfat tinggi, ketika sampai di Kadodo dan Kokombie sudah terencerkan oleh air permukaan. Proses pencampuran air panas dengan air meteorik menghasilkan air dengan temperatur dan konsentrasi anion kation yang lebih rendah. Pengkayaan unsur Mg dari air meteorik mengakibatkan fluida panas yang berkomposisi baru di Kadodo dan Kokombie memiliki konsentrasi klorida dan sulfat lebih rendah. Air panas yang semula diperkirakan berasal dari fluida panas hasil proses kesetimbangan (*equilibrium*) pada sistem vulkanik Gunung Awu, kini sudah tidak mencerminkan air kesetimbangan, melainkan air *immature water*.

Karakteristik kimia air yang berkomposisi sulfat diperkirakan sebagai bagian dari sistem panas bumi konvektif yang berasosiasi sistem vulkanik-hidrotermal. Semakin air panas tersebut bergerak jauh menuruni lereng Gunung Awu, maka air panas akan semakin mendingin dengan konsentrasi kimia yang

lebih rendah dan pH airnya semakin netral. Jika dibandingkan dengan model konseptual sistem panas bumi di dataran tinggi (*high relief*) menurut Nicholson (1993), mata air panas Kadodo dan Kokombie merupakan bagian dari mata air panas asam-sulfat dari akuifer tenggak (*perched aquifer*). Lokasi kehadiran mata air panas tersebut diperkirakan sebagai batas terluar dari zona *upflow* dari sistem panas bumi (sistem gunung api) Gunung Awu.

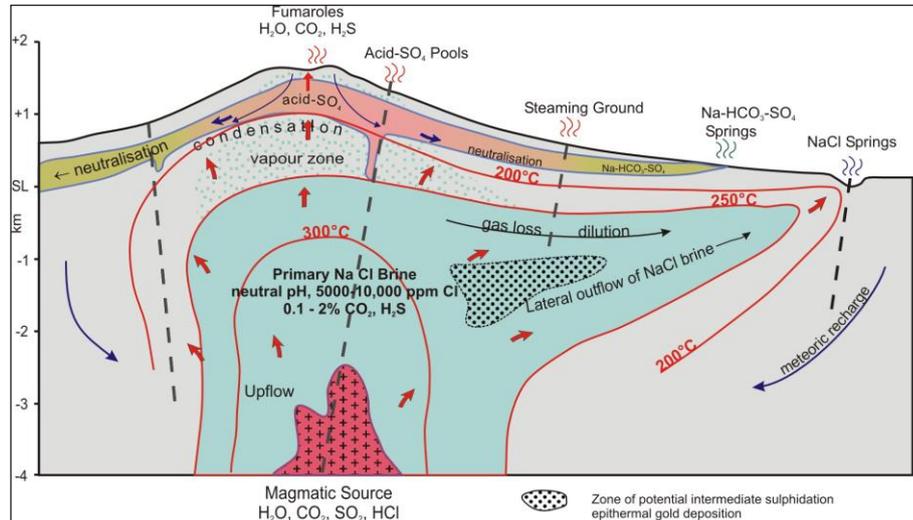
Sistem panas bumi vulkanik-hidrotermal umumnya terdapat pada daerah gunungapi strato aktif maupun tidak aktif. Dalam sistem ini memungkinkan terbentuknya intrusi dangkal sampai 1 km dengan kedalaman reservoir kurang dari 1,5 km. Fluida dari air meteorik maupun campuran dengan fluida magmatik naik secara vertikal dan memungkinkan mengalir secara lateral, tergantung topografi dan hidrologinya (**Gambar 13**). Kondisi seperti ini diperkirakan terjadi pada sistem panas bumi di Sangihe (Gunung Awu).

Area Prospek dan Potensi Panas Bumi

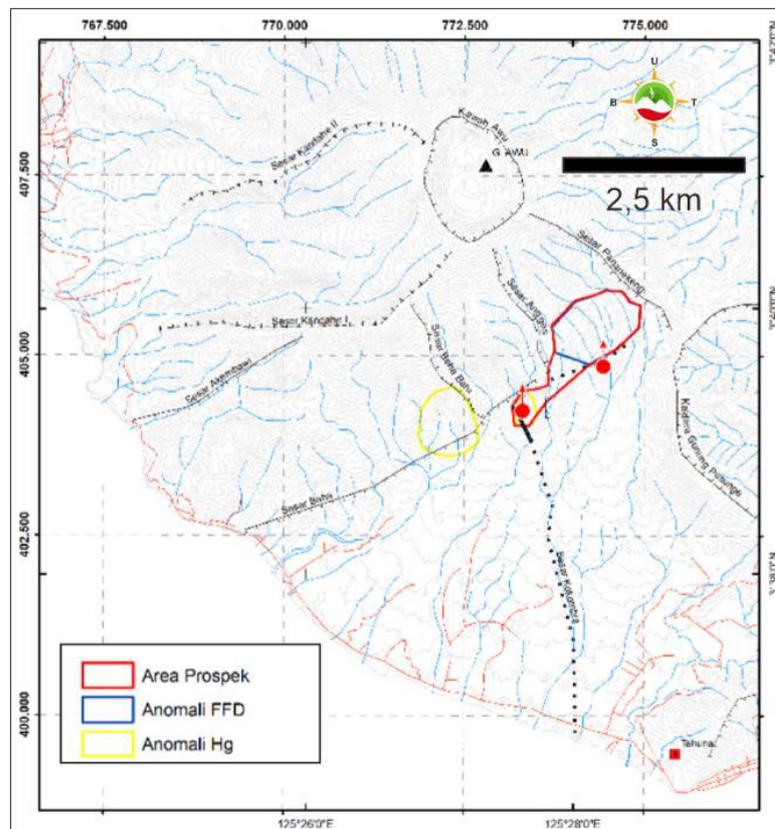
Area prospek panas bumi di daerah Angges dikontrol oleh anomali FFD dan anomali Hg. Anomali FFD mengontrol daerah prospek di sekitar mata air panas Kadodo. Sementara itu anomali Hg mengontrol daerah prospek di sekitar mata air panas Kokombie. Berdasarkan dua anomali tersebut, didapatkan area prospek

daerah panas bumi Angges di sekitar mata air panas Kadodo dan Kokombie dengan luas sekitar 1,2 km² (Gambar 14). estimasi sumber daya panas bumi menggunakan

metode kesebandingan, dengan luas area sekitar 1,2 km² dan rapat daya 6 MW/km², didapatkan nilai sumber daya sebesar **7 MWe** pada kelas sumber daya spekulatif.



Gambar 13. Model Konseptual Sistem Vulkanik-Hidrotermal yang Berasosiasi dengan Manifestasi (Henly & Ellis dalam Lawless, dkk., 1995)



Gambar 14. Area Prospek Daerah Panas Bumi Angges

KESIMPULAN DAN SARAN

Daerah Panas Bumi Angges terletak pada daerah dengan tektonik aktif di sebelah utara Pulau Sulawesi. Secara tatanan geologi, daerah panas bumi Angges termasuk ke dalam sistem panas bumi vulkanik dengan Gunungapi Angges sebagai sumber panas. Berdasarkan analisis geotermometer silika, temperatur reservoir sistem panas bumi Angges diperkirakan sebesar 150-160 °C, sehingga termasuk ke dalam sistem panas bumi temperatur menengah (*medium temperature*). Estimasi sumber daya panas

bumi Angges sebesar 7 MWe pada kelas sumber daya spekulatif.

Untuk mengetahui sistem panas bumi Angges dengan lebih detail diperlukan penyelidikan yang lebih rinci dan menyeluruh. Keputusan untuk melakukan penyelidikan lanjutan harus memperhatikan status Gunungapi Awu yang termasuk ke dalam gunungapi tipe A atau masih aktif. Mengingat temperatur manifestasi yang hangat, maka pemanfaatan yang bisa digunakan secara langsung adalah pemandian air hangat dengan catatan akses menuju mata air panas sedikit menantang.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Geologi. (2011). *Data Dasar Gunung Api Indonesia* (Kedua ed.). Bandung.
- Belhai, M., Fujimitsu, Y., Bouchareb-Haouchine, F., Iwanaga, T., Noto, M., & Nishijima, J. (2016). Hydrogeochemical and Isotope Geochemical Study of Northwestern Algerian Thermal Waters. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Cardwell, R., & Isacks, B. (1981). Subduction and the zones of recent earthquakes in the Sunda Arc. *Journal of Geophysical Research*, 3239-3255.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Hamilton, W. (1979). Tectonics of the Indonesian region. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1078*.
- Hartono, U. (1994). *The Petrology and Geochemistry of the Wilis and Lawu Volcanoes, East Java, Indonesia*.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2017). *Peta Tata Guna Lahan*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

- Lawless, J., White, P., Bogie, I., & Andrews, M. (1995). Tectonic Features of Sumatra and New Zealand in Relation to Active and Fossil Hydrothermal Systems: a Comparison. *Proceedings of the AusIMM Pacific Rim Congress*. Auckland.
- Mutlu, H., & Güleç, N. (1998). Hydrogeochemical Outline of Thermal Waters and Geothermometry Applications in Anatolia (Turkey). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 495-515.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Technique*. Springer Berlin, Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-77844-5>
- Reyes, A., Christenson, B., & Faure, K. (2010). Sources of Solutes and Heat in Low-Entalphy Mineral Waters and Their Relation to Tectonic Setting, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117-141.
- Samodra, H. (1994). *Peta Geologi Lembar Sangihe dan Siau, Sulawesi*.
- Zuidam, R. A. (1983). *Guide to Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation and Mapping*.
- Zuidam, R. A. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*.

SURVEI RINCI GAYA BERAT DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON KABUPATEN TAPANULI UTARA, PROVINSI SUMATERA UTARA

Yudi Aziz Muttaqin, Wiwid Joni, dan Toni Rahadinata

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Kegiatan survei rinci gaya berat di daerah panas bumi Sipoholon Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara telah dilakukan pada tahun 2023 menggunakan alat gravity meter Scintrex CG6 seri 310 dan 311. Pengukuran gaya berat dilakukan pada 282 titik ukur dengan jarak antara titik ukur 750 – 1500 m yang tersebar secara acak. Hasil pengolahan data gaya berat berupa peta anomali Bouguer (CBA) memperlihatkan variasi nilai -64 mGal hingga -28 mGal. Setelah disubstraksi oleh anomali regional menghasilkan anomali residual yang merupakan cerminan struktur dangkal dengan variasi nilai -15 mGal hingga 13 mGal. Pola anomali CBA relatif bersesuaian dengan anomali residual. Hasil kedua anomali CBA dan residual menunjukkan adanya anomali tinggi berupa spot berada di antara mata air panas Sipoholon dan Panabungan. Hasil analisis kelurusan menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *First Vertical Derivative* (FVD) menunjukkan kelurusan berarah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut. Namun pada hasil FVD terlihat ada pola melingkar di sekitar mata air panas Sipoholon yang tidak terlihat pada hasil FHD. Pola struktur melingkar tersebut juga terlihat dari hasil analisis *Second Vertical Derivative* (SVD). Keberadaan struktur melingkar tersebut bersesuaian dengan anomali tinggi pada peta CBA dan residual yang diduga berhubungan dengan batuan pembawa panas dari sistem panas bumi Sipoholon.

Kata kunci: mata air panas, gaya berat, Sipoholon, anomali Bouguer

PENDAHULUAN

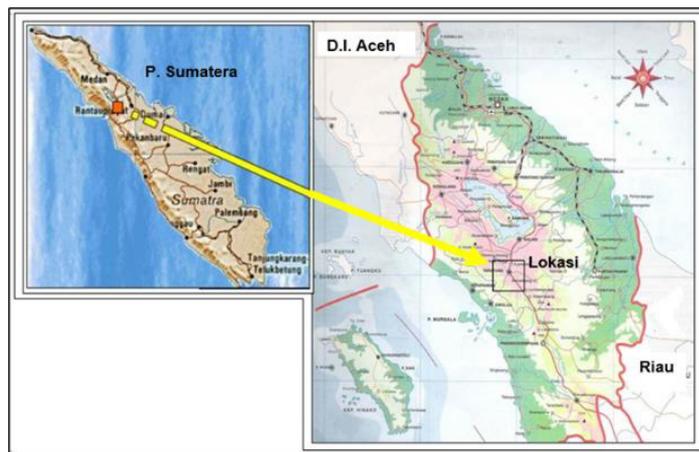
Daerah panas bumi Sipoholon terletak di beberapa kecamatan di wilayah Kabupaten Tapanuli Utara diantaranya Sipoholon, Tarutung, Sipahutar, Siborong Borong, Pagaran, Siatas Barita dan Parmonangan. Kegiatan survei rinci gaya berat di daerah ini merupakan survei

penambahan data gaya berat yang telah dilakukan sebelumnya pada tahun 2005.

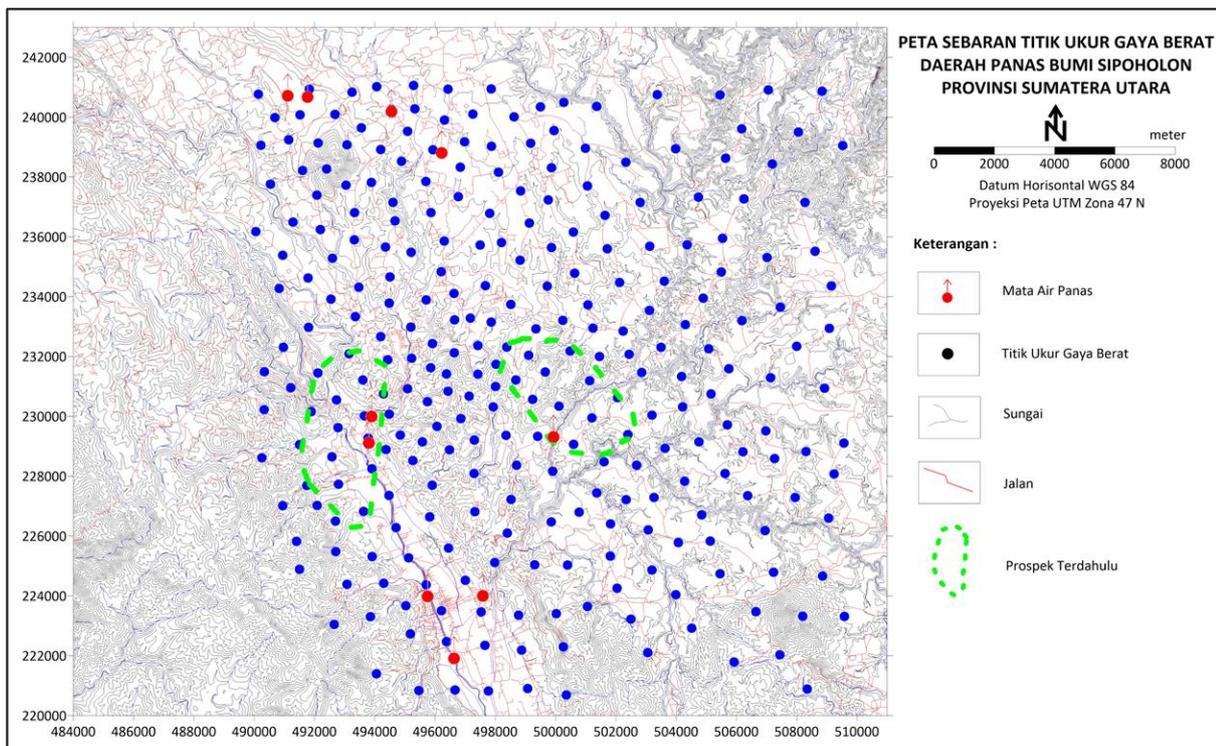
Metode gaya berat merupakan metode pasif yang melibatkan pengukuran variasi medan gravitasi bumi, akibat perubahan densitas secara lateral dibawah permukaan tanah (Santos, P. A., dan Rivas, J.A., 2009).

Studi gaya berat ini diharapkan dapat memperlihatkan variasi densitas bawah permukaan yang terkait dengan struktur dan magmatisme Gunungapi. Terdapat korelasi antara nilai anomali gaya berat dengan pusat vulkanisme terakhir, sesar-sesar, dan aktivitas panas bumi (Mariita, N. O., 2010).

Dalam makalah ini penulis menyajikan sebaran anomali gaya berat yang berasosiasi dengan sistem panas bumi Sipoholon dan diharapkan dapat memberikan informasi kelurusan-kelurusan yang berkorelasi dengan struktur-struktur yang mendukung dalam pembentukan sistem panas bumi Sipoholon.



Gambar 1. Peta Lokasi penyelidikan



Gambar 2. Peta sebaran titik ukur gaya berat

METODE GAYA BERAT

Metode gaya berat merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan variasi medan gravitasi bumi untuk melihat struktur bawah permukaan. Akibat bentuk bumi yang tidak bulat homogen sempurna, percepatan gravitasi tidaklah konstan pada permukaan bumi. Besarnya gravitasi bergantung kepada lima faktor, yaitu: posisi lintang, elevasi, topografi medan, pasang surut, dan variasi densitas di bawah permukaan (Telford, W. M., dkk, 1990). Setelah semua koreksi gaya berat diterapkan pada bacaan alat, akan diperoleh nilai anomali Bouguer (g_{AB}). Nilai anomali Bouguer ini diharapkan dapat menghasilkan sebaran variasi densitas yang lebih rinci di daerah penyelidikan.

Pengukuran gaya berat telah dilakukan pada 282 titik pengukuran dengan jarak antara titik pengukuran 750 – 1500 m yang tersebar secara acak/random. Secara umum jarak antar titik sekitar 1000 m, tetapi pada zona yang menarik jarak antar titik ukur tersebut diperapat menjadi 750 m dan untuk daerah yang cukup jauh dari zona menarik jarak antar titik ukur diperlebar menjadi 1500 m (Gambar 2).

GEOLOGI

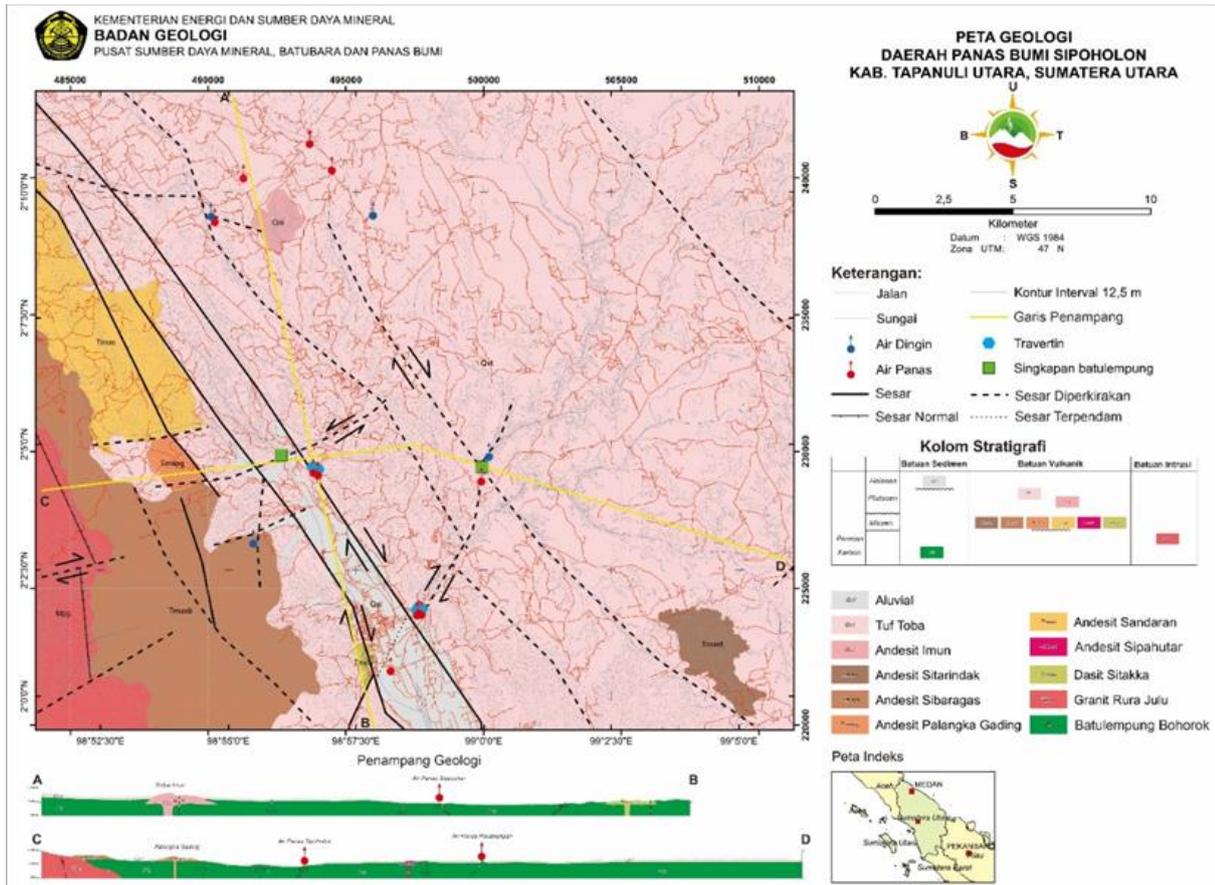
Aktifitas tektonik daerah Panas Bumi Sipoholon, secara regional dipengaruhi oleh kegiatan tektonik pergerakan lempeng – lempeng utama yaitu Eurasia di utara dan Hindia Australia

di selatan yang membentuk busur magmatik, terlihat dari adanya sabuk gunungapi berumur Paleogen sampai Resen yang terbentuk di atas zona Benioff. Sabuk gunungapi ini membentang dari ujung utara Sumatera sampai Teluk Semangko di bagian selatan.

Daerah panas bumi Sipoholon berada pada morfologi datar hingga curam. Litologi yang menyusun daerah panas bumi Sipoholon adalah Satuan Batulempung Bohorok dan Satuan Granit Rura Julu sebagai batuan alas, Satuan Dasit Sitakka, Satuan Andesit Sandaran, Satuan Andesit Palangka Gading, Satuan Andesit Sibaragas, Satuan Andesit Sitarindak, Satuan Andesit Sipahutar, Satuan Andesit Imun yang tertutupi oleh Satuan Tuf Toba dan Aluvial (Gambar 3).

Struktur geologi di daerah Sipoholon memiliki arah umum baratlaut-tenggara yang merupakan segmen Sesar Sumatera dan timurlaut-baratdaya. Sesar-sesar di daerah Sipoholon umumnya berkorelasi dengan kehadiran Sesar Sumatera. Putra dan Husein (2016) menyebutkan bahwa Cekungan Tarutung-Sarulla merupakan suatu *pull-apart basin*.

Daerah panas bumi Sipoholon diidentifikasi berdasarkan kehadiran mata air panas dengan temperatur 34,8-64,5°C. Daerah panas bumi Sipoholon termasuk sistem panas bumi non-vulkanik dengan transfer panas melalui mekanisme *heat sweep*.



Gambar 3. Peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Simarmata, 2023)

HASIL DAN PEMBAHASAN

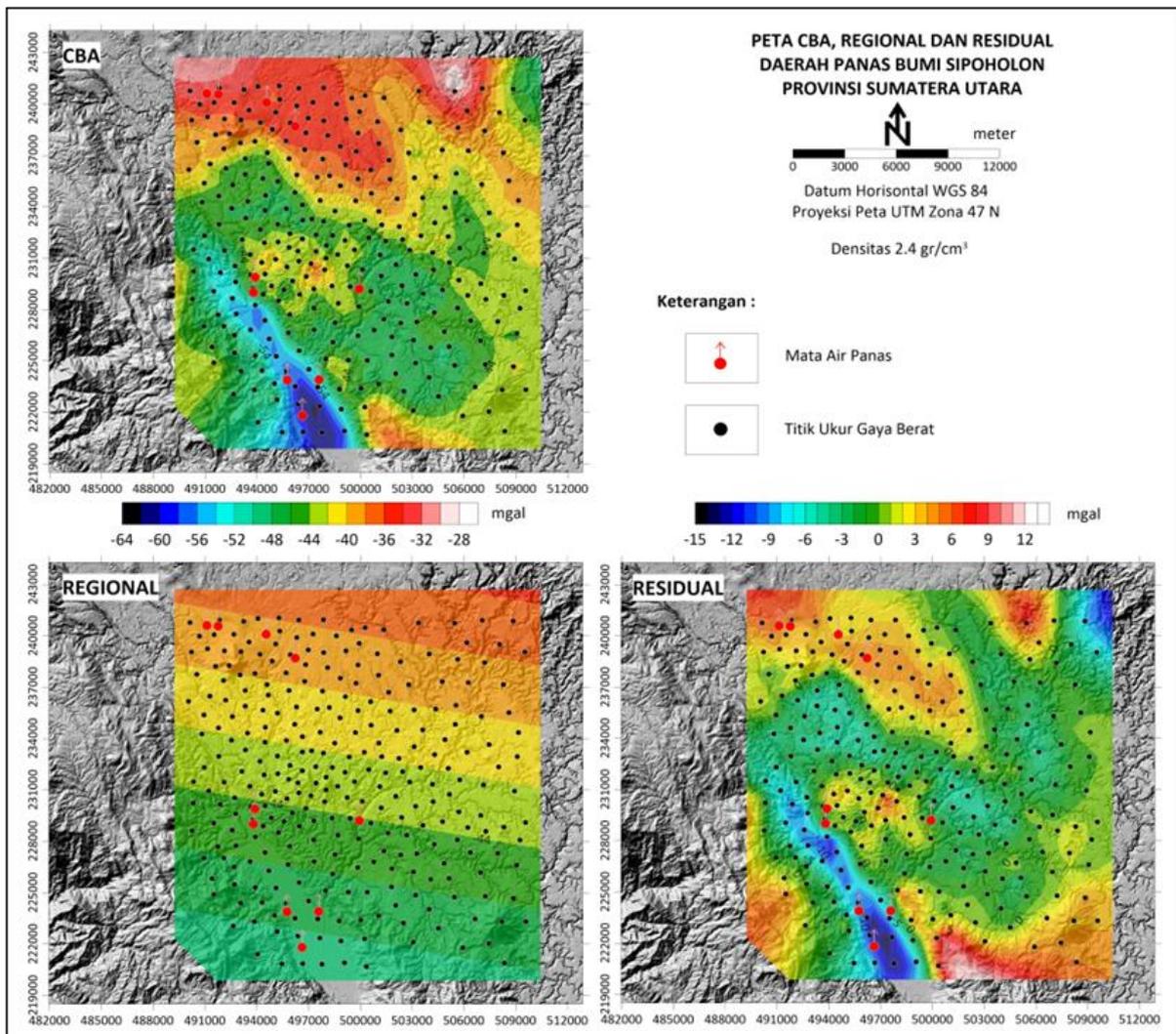
Peta anomali Boguer (CBA), regional, dan residual adalah hasil pengolahan data gaya berat yang ditunjukkan pada Gambar 4. Kontur CBA memiliki variasi anomali -64 hingga -28 mGal. Hasil anomali CBA menunjukkan anomali tinggi yang bervariasi -40 hingga -28 mGal muncul di bagian utara dan relatif meluas ke arah timur dan tenggara daerah penyelidikan. Hal yang menarik adanya anomali relatif tinggi -44 hingga -38 mGal berupa spot berada di antara mata air panas Sipoholon dan Panabungan. Keberadaan spot tersebut berada di dalam anomali relatif sedang. Sedangkan

keberadaan anomali sedang tersebut dikelilingi oleh anomali tinggi (bagian utara relatif meluas ke arah timur dan tenggara) dan anomali rendah di bagian baratnya yang merupakan respon depresi Tarutung.

Dengan melakukan polinomial orde 1 menghasilkan anomali regional yang memiliki variasi anomali -50.5 hingga -35.5 mGal dengan pola lineasi kontur relatif berarah baratlaut-tenggara. Pola anomali regional tersebut meninggi ke arah utara atau merendah ke arah selatan daerah penyelidikan. Kelurusan struktur dalam tersebut merupakan cerminan Sesar Sumatera yang juga berarah baratlaut-tenggara. Peta kontur anomali residual

merupakan hasil matematis dari pengurangan anomali CBA terhadap anomali regional, sehingga menghasilkan kontur kontras densitas pada struktur dangkal. Hasil anomali sisa menghasilkan variasi anomali -15 hingga 13 mGal relatif memiliki pola yang mirip dengan peta kontur CBA. Nilai anomali tinggi >5 mGal berada di bagian barat laut dan relatif timur daerah penyelidikan. Anomali tinggi tersebut juga berada di bagian baratdaya dan tenggara yang diperkirakan sebagai respon batuan andesit berumur Tersier. Hal

yang menarik adanya anomali tinggi berupa spot yang berada di antara mata air panas Sipoholon dan Panabungan. Nilai anomali relatif tinggi >0 mGal secara tegas berada di antara kedua mata air panas Sipoholon dan Panabungan. Nilai anomali relatif tinggi tersebut juga meluas dari barat laut ke arah tenggara, dan juga dari baratdaya ke utara daerah penyelidikan. Pada bagian relatif baratdaya ditemukan adanya anomali rendah <-5 mGal yang merupakan respon zona depresi Tarutung (Gambar 4).



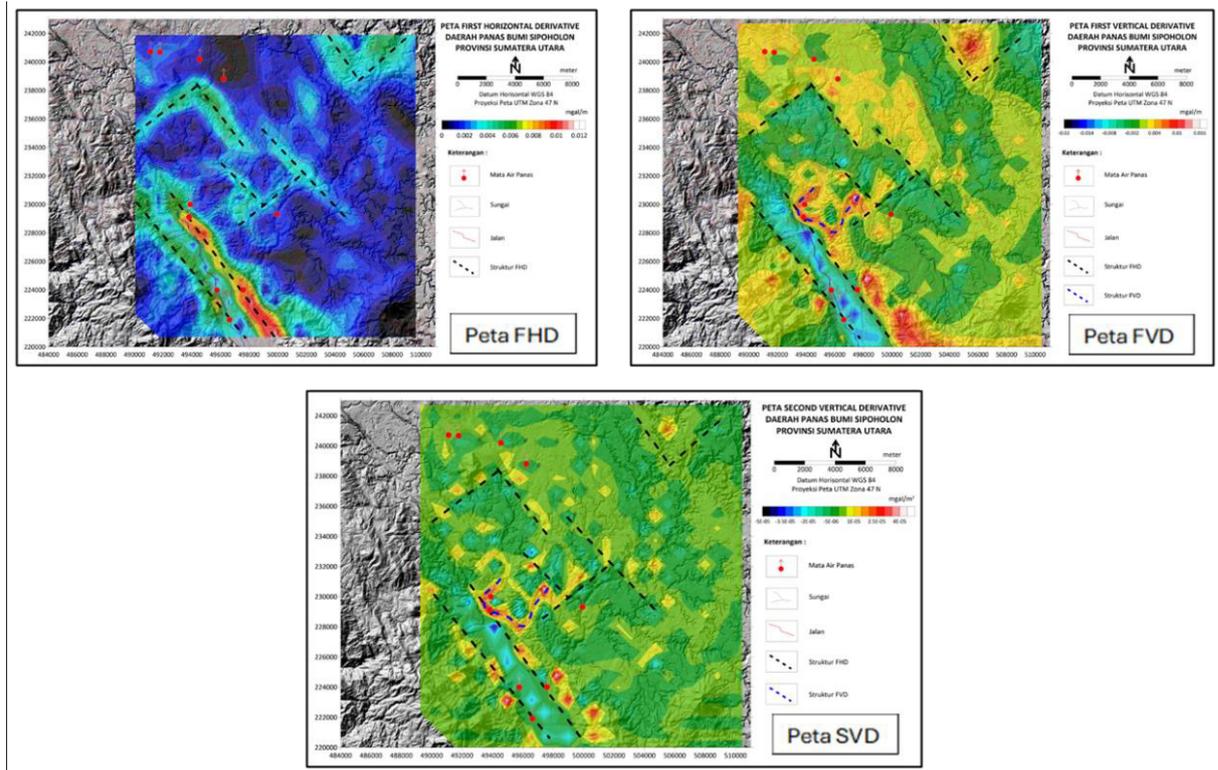
Gambar 4. Peta anomali Gaya Berat (CBA, Regional, dan Residual)

Penggunaan data gradien gaya berat dalam eksplorasi menjadi hal yang umum. Untuk menunjukkan pola kompleks anomali yang terkait dengan gradien gaya berat dapat dilakukan menggunakan *First Horizontal Derivative* (FHD) terhadap arah x dan y (Gambar 5), sedangkan *First Vertical Derivative* (FVD) terhadap arah z pada (Gambar 5). Kehadiran struktur diindikasikan oleh nilai maksimum FHD. Hasil nilai maksimum FHD merepresentasikan kontras densitas lateral yang mungkin terkait dengan struktur. Keberadaan struktur mengindikasikan kemungkinan adanya permeabilitas. FVD berguna untuk penentuan struktur yang memiliki kontras densitas lemah. Meskipun material yang dibawa oleh produk vulkanik adalah material dan kondisi lingkungan sama. FVD dapat menghasilkan akumulasi area dengan densitas rendah atau tinggi terhadap sekitarnya (tergantung pada karakteristik pendinginan dan akumulasi) sehingga memiliki densitas berbeda tetapi produk dari sumber daya yang sama.

Interpretasi struktur dari FHD direpresentasikan oleh garis hitam putus-putus (Gambar 5). Struktur hasil FHD secara umum berarah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut. Perpotongan struktur memungkinkan area sekitar struktur memiliki permeabilitas yang baik. Hasil struktur FHD ditumpang tindihkan terhadap peta FVD (Gambar 5) menghasilkan kesesuaian kontras densitas

antara hasil FHD dan FVD. Hal yang menarik adanya kontras densitas tinggi di sekitar mata air panas Ria-Ria Sipoholon dan Panabungan berupa pola melingkar. Perlu dicatat bahwa amplitudo anomali gravitasi Bouguer yang disebabkan oleh sumber dangkal dan lemah mungkin jauh lebih kecil daripada yang disebabkan oleh yang lebih besar dan terkubur dalam. FVD dapat meningkatkan anomali yang lemah dan di dekat permukaan. Pola melingkar hasil FVD tersebut kemungkinan berhubungan dengan struktur yang membantu mata air panas Ria-Ria Sipoholon dan Panabungan atau bisa diasumsikan sebagai batas tepi sumber panas dari sistem panas bumi di daerah penyelidikan tersebut.

Metode *Second Vertical Derivative* (SVD) merupakan berbagai kombinasi komponen gradien gaya berat dapat digunakan untuk menghasilkan hasil yang lebih terlokalisasi dan lebih terkait dengan ukuran dan bentuk sumber di bawah permukaan. Pola struktur FHD juga relatif bersesuaian dengan hasil kelurusan SVD (Gambar 5). Hal yang menarik adalah pola struktur FVD berupa pola melingkar di sekitar mata air panas Sipoholon juga dihasilkan oleh struktur SVD. Keberadaan struktur melingkar tersebut diduga sebagai respon anomali bawah permukaan yang diinterpretasikan berhubungan dengan pembawa panas dari sistem panas bumi daerah Sipoholon.

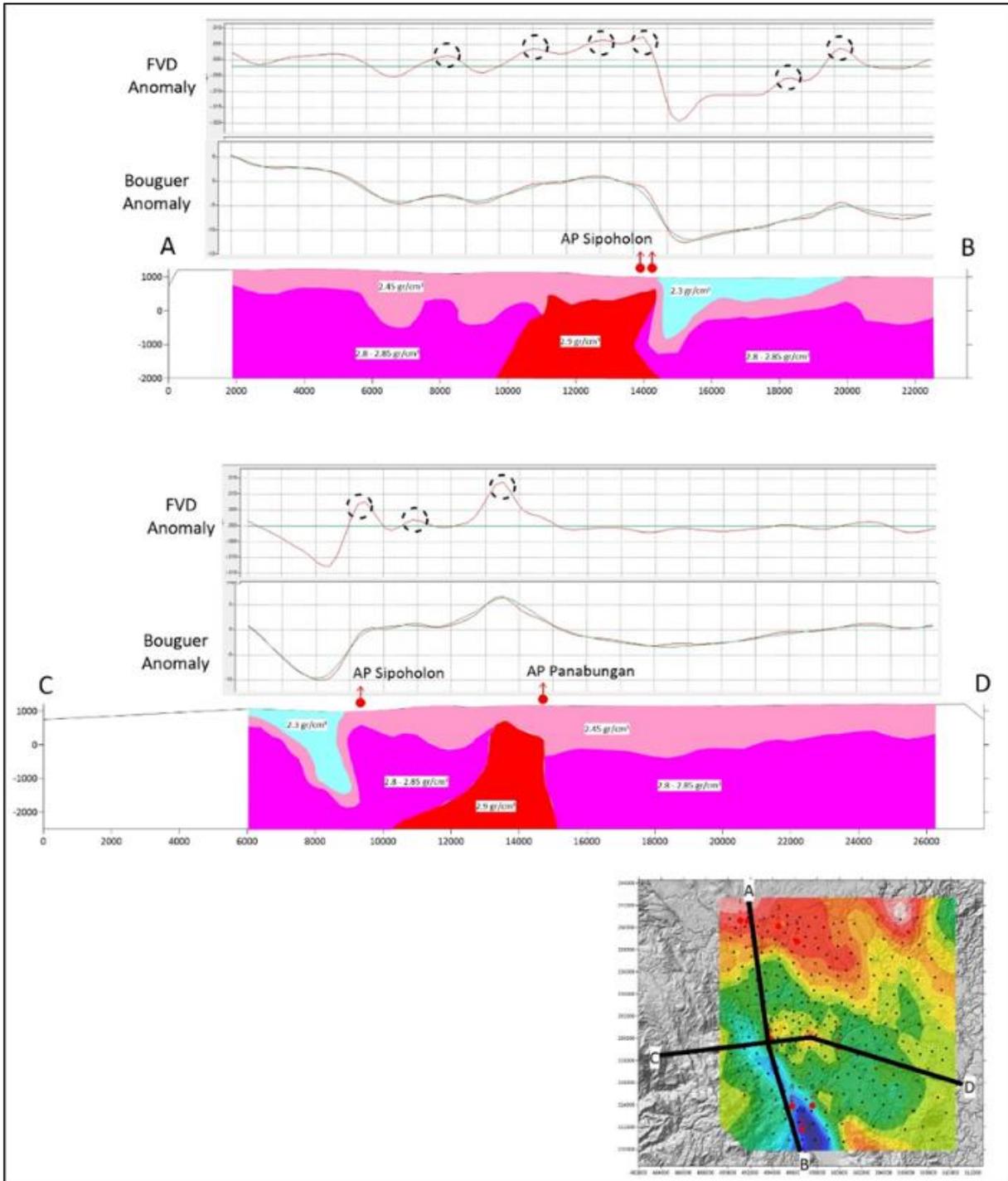


Gambar 5. Peta FHD, Peta FVD, dan Peta SVD

Gambar 6 menunjukkan pemodelan kedepan (*forward modelling*) data gaya berat 2.5-D pada lintasan AB yang berarah relatif utara-selatan dan lintasan CD berarah relatif barat-timur. Pada kedua model tersebut, adanya batuan warna biru muda yang memiliki densitas 2.3 gr/cm^3 yang merefleksikan zona depresi Tarutung terisi oleh batuan sedimen. Batuan dibawahnya berwarna pink dengan densitas 2.45 gr/cm^3 diasumsikan sebagai batuan tuff Toba. Lapisan batuan yang berada dibawah batuan tuff Toba adalah batuan warna ungu yang memiliki densitas $2.8 - 2.85 \text{ gr/cm}^3$ diduga merupakan respon batuan formasi Andesit berumur Tersier. Hal yang menarik adalah adanya batuan

warna merah dengan densitas 2.9 gr/cm^3 berada diantara kedua mata air panas Sipoholon dan Panabungan yang diinterpretasikan sebagai batuan pembawa panas dari kedua mata air panas tersebut.

Kedua model tersebut juga menampilkan anomali *First Vertical Derivative* (FVD). Metode FVD dapat membedakan perbedaan densitas berbeda pada unit batuan yang sama, sehingga perbedaan densitas tersebut dapat diasumsikan sebagai celah atau struktur di bawah permukaan. Lingkaran putus-putus warna hitam mengindikasikan adanya struktur di bawah permukaan yang tentu mengindikasikan adanya perbedaan densitas pada unit batuan yang sama.



Gambar 6. Model data gaya berat 2.5D

KESIMPULAN

Kontur anomali CBA menghasilkan variasi nilai -64 hingga -28 mGal. Setelah di substraksi oleh anomali anomali regional menghasilkan anomali residual yang

merupakan cerminan struktur dangkal dengan variasi nilai -15 hingga 13 mGal. Pola anomali CBA relatif bersesuaian dengan anomali residual setelah dilakukan pemisahan anomali menggunakan

polinomial orde 1. Hasil kedua anomali CBA dan residual menunjukkan adanya anomali tinggi menarik relatif berupa spot berada di antara mata air panas Sipoholon dan Panabungan.

Hasil kelurusan struktur FHD relatif mirip dengan kelurusan struktur FVD dengan pola kelurusan berarah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut. Hal yang menarik adanya struktur FVD yang dihasilkan di sekitar mata air panas Sipoholon berupa pola melingkar yang tidak didapatkan oleh metode FHD. Hasil struktur melingkar tersebut juga dihasilkan oleh metode SVD. Keberadaan struktur

melingkar tersebut bersesuaian dengan anomali tinggi menarik hasil dari anomali CBA dan residual. Struktur melingkar/anomali tinggi tersebut diduga berhubungan dengan pembawa panas dari sistem panas bumi daerah Sipoholon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih tim penulis hantarkan kepada para staf Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas bumi Tim Kerja Keprospekan Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi yang telah berperan serta dalam penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Longman, I. M. (1959). *Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun*. J. Geophys Res 64, 51-56.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Anonim-1. (2005). Penyelidikan Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Sipoholon Siria-ria, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.
- AFIF H. SAAD, Saad GeoConsulting, Richmond, Texas, USA, *Understanding gravity gradients-a tutorial*, The Leading Edge, August 2006.
- Anonim-2. (2010). Survei Magnetotellurik Daerah Panas Bumi Sipoholon Riaria, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.
- Nukman, M. (2014). *Geothermal exploration involving structural geology and hydrochemistry in the Tarutung Basin, Northern Central Sumatra (Indonesia)*. Technischen Universität Berlin, Fakultät VI Planen Bauen Umwelt. Berlin: Technischen Universität Berlin
- Muksin. (2014). *A Fault-Controlled Geothermal System In Tarutung (North Sumatra, Indonesia) Investigated By Seismological Analysis*. Universität Potsdam, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Potsdam: Universität Potsdam.

- Putra, A. F., & Husein, S. 2016. *Pull-Apart Basins of Sumatran Fault: Previous Works and Current Perspectives*. Proceedings Seminar Nasional Kebumihan Ke-9.
- Tolga Gönenç, 2014. *Investigation of distribution of embedded shallow structures using the first order vertical derivative of gravity data*, Journal of Applied Geophysics 104 (2014) 44-57.
- Niasari, S. W. (2015). *Magnetotelluric Investigation of the Sipoholon Geothermal Field, Indonesia*. Freien Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften. Berlin: Freien Universität Berlin.
- Rahadinata, T. (2017). Laporan Survei Magnetotellurik (MT) dan Time Domain Elektromagnetik (TDEM) Daerah Panas Bumi Sipoholon Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- Simarmata, R.S.L, Sukaesih, Supriyadi, Y., dan Mustofa, S.A. (2023). Laporan Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Sipoholon-RiaRia, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.

PENGEBORAN DAN SURVEI LANDAIAN SUHU PANAS BUMI DI DAERAH GUNUNG ENDUT (2 X 500 M)

Nizar Muhamad Nurdin, Lano Adhitya Permana, Yuanno Rezky, Arif Munandar

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Secara administratif, kegiatan pengeboran dan survei landaian suhu panas bumi di Daerah Gunung Endut terletak di wilayah Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Kegiatan survei landaian suhu ini mencakup pengeboran di dua titik, yakni sumur END-1A dan END-2. Sumur END-1A berada pada koordinat 645.100 mT dan 9.270.028 mU dengan elevasi 530 mdpl, sementara sumur END-2 berada pada koordinat 643.266 mT dan 9.269.023 mU dengan elevasi 488 mdpl (UTM Zona 49S).

Litologi yang menyusun sumur END-1A hingga kedalaman akhir 111,15 meter merupakan produk aktivitas vulkanik Gunung Endut, yang mengalami ubahan dengan intensitas lemah sampai menengah, dan tergolong dalam jenis ubahan sub-propilitik. Sementara itu, litologi sumur END-2 hingga kedalaman akhir 502 meter juga merupakan produk aktivitas vulkanik Gunung Endut, yang mengalami ubahan dengan intensitas lemah sampai menengah, dan tergolong dalam jenis ubahan argilik.

Pada sumur END-1A, terjadi dua kali hilang sirkulasi parsial pada lumpur pembilas, yaitu pada kedalaman 41,45-46,45 meter dan 69,30-72,00 meter sebanyak 10-30 liter per menit. Hal ini mengindikasikan bahwa sumur END-1A memiliki porositas dan permeabilitas yang cukup tinggi. Sedangkan pada sumur END-2, terjadi hilang sirkulasi lumpur pembilas sebagian dan total. Hilang sirkulasi parsial terjadi pada kedalaman 286,45-314,45 meter, 321,00-356,00 meter, dan 356-431,00 meter sebesar 10-30 liter per menit, sementara hilang sirkulasi total terjadi pada kedalaman 8,45-12,45 meter dan 281,45-286,45 meter dengan laju lebih dari 100 liter per menit. Hal ini menunjukkan bahwa sumur END-2 memiliki intensitas rekahan/kekar yang cukup tinggi akibat deformasi formasi batuan.

Berdasarkan hasil perhitungan dengan metode Horner Plot, pada sumur END-1A diperoleh temperatur formasi sebesar 44°C pada kedalaman 77 meter, dengan nilai landaian suhu (thermal gradient) sebesar 23,74°C/100 meter, atau sekitar delapan kali lebih besar dari gradien rata-rata bumi ($\pm 3^\circ\text{C}/100$ meter). Pada sumur END-2, temperatur formasi sebesar 81,39°C pada kedalaman 500 meter, dengan nilai landaian suhu sebesar 11,1°C/100 meter, atau sekitar empat kali lebih besar dari gradien rata-rata bumi ($\pm 3^\circ\text{C}/100$ meter).

Kata kunci: landaian suhu, gunung endut, panas bumi

PENDAHULUAN

Panas bumi merupakan energi yang ramah lingkungan dan relatif kompetitif untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik terutama bagi daerah yang memiliki kebutuhan energi tinggi seperti pemenuhan kebutuhan energi listrik.

Hasil survei geosains yang telah dilakukan oleh Pusat Sumber Daya Panas Bumi (PSDMBP) – Badan Geologi pada tahun 2021 di daerah Gunung Endut, menyebutkan bahwa di daerah Gunung Endut terdapat dua area prospek, yaitu prospek di sekitar mata air panas Cikawah dan prospek di bagian barat daerah Gunung Endut (*hidden geothermal system*). Secara keseluruhan sumber daya panas bumi di daerah Gunung Endut adalah sekitar 38 Mwe pada kelas cadangan mungkin.

Survei pengeboran landaian suhu yang dilakukan pada tahun 2024 ini bertujuan untuk memperoleh data-data bawah permukaan (*subsurface*) yang meliputi landaian suhu (*thermal gradient*), litologi, mineral ubahan, intensitas ubahan, dan tipe ubahan, serta mengevaluasi potensi panas bumi dari hasil penyelidikan yang telah dilakukan sebelumnya.

Dua sumur landaian suhu (END-1A dan END-2) dibor untuk mengukur temperatur formasi dan gradien panas bumi. Secara administratif, kegiatan pengeboran dan survei landaian suhu panas bumi di Daerah Gunung Endut

terletak di wilayah Kabupaten Lebak, Provinsi Banten (Gambar 1). Kegiatan survei landaian suhu ini mencakup pengeboran di dua titik, yakni sumur END-1A dan END-2. Sumur END-1A berada pada koordinat 645.100 mT dan 9.270.028 mU dengan elevasi 530 mdpl, sementara sumur END-2 berada pada koordinat 643.266 mT dan 9.269.023 mU dengan elevasi 488 mdpl (UTM Zona 49S).

OPERASI PENGEBORAN

Operasi pengeboran landaian suhu END-1A dan END-2 dilaksanakan dalam beberapa tahapan atau trayek pengeboran, yaitu: trayek selubung 6", trayek selubung 4", dan trayek *open hole* (HQ). Program trayek pengeboran Sumur END-1A tidak berjalan sesuai rencana karena kondisi sumur yang tidak memungkinkan, sedangkan sumur END-2 berjalan sesuai dengan rencana. Konstruksi sumur END-1A dan END-2 ditampilkan pada Gambar 2. Secara lebih rinci kegiatan pengeboran diuraikan sebagai berikut.

▪ Sumur END-1A

Trayek 6" (lubang 7 $\frac{7}{8}$ ")

Pengeboran (*coring*) HQ formasi dengan menggunakan *diamond bit* (DB) ukuran HQ dari kedalaman 0 s.d. 21,95 m. Angkat rangkaian ke permukaan untuk menurunkan *casing* HW dari kedalaman 0 s.d. 18 m untuk mencegah runtuh pada lubang sumur. Lanjut bor formasi (*coring*) dengan DB HQ dari kedalaman 21,95 s.d.

42,75 m. Angkat rangkaian HQ dan *casing* HW sampai permukaan. Perbesar lubang (*reaming*) menggunakan rangkaian *tricone bit* (TB) 7 $\frac{7}{8}$ " dari kedalaman 0 s.d. 38,4 m. Cabut rangkaian TB ke permukaan. Kondisikan lubang untuk set selubung 6". Masuk selubung 6" dari permukaan hingga kedalaman 32,00 m (*casing shoe*) dan semen selubung 6".

Trayek *Open Hole* (lubang HQ)

Bor semen menggunakan rangkaian DB HQ dari kedalaman 27,80 s.d. 39,25 m. Lanjut bor (*coring*) formasi dengan DB HQ dari kedalaman 39,25 s.d. 111,40 m. Pada kedalaman 70 s.d. 111,15 m ada beberapa kendala pada lubang sumur berupa formasi yang tidak stabil yang mengakibatkan runtuh pada lubang sumur, formasi yang bersifat lengket dan mengembang (*sticky* dan *swelling clay*), kehilangan sirkulasi sebagian (40-60 L/menit), dan *influx* air formasi pada kedalaman 90-100 meter. Atasi kendala lubang sumur dengan melakukan semen sumbat, menurunkan *casing* NW, serta melakukan pengeboran dengan beberapa rangkaian TB 5 $\frac{5}{8}$ ", PDC, dan NQ secara bergantian. Kendala tidak dapat diatasi. Logging temperatur pada kedalaman 77 m. Tutup dan tinggalkan lubang sumur END-1A, dilanjutkan reklamasi lahan.

▪ Sumur END-2

Trayek 6" (lubang 7 $\frac{7}{8}$ "")

Tahapan awal pengeboran sumur END-2 menggunakan rangkaian PDC +

Stabilizer + Rod HQ untuk pengeboran non-*coring* dari kedalaman 0 hingga 4,75 meter. Setelah itu, rangkaian diangkat ke permukaan untuk mengganti *Bore Hole Assembly* (BHA) dengan DB HQ + Core Barrel + Rod HQ, dan pengeboran *coring* dilanjutkan dari kedalaman 4,75 hingga 8,45 meter. Turunkan *casing* HW untuk mengatasi kehilangan sirkulasi total. Pengeboran *coring* kemudian dilanjutkan menggunakan rangkaian DB HQ dari kedalaman 8,45 hingga 31,85 meter. Setelah selesai, rangkaian HQ diangkat kembali ke permukaan untuk persiapan pemasangan *Tricone Bit* (TB) 7 $\frac{7}{8}$ " dan selubung 6". Perbesar lubang (*reaming*) menggunakan rangkaian *tricone bit* (TB) 7 $\frac{7}{8}$ " + *Drill Collar* (DC) dari kedalaman 0 s.d. 26,25 m. Kondisikan lubang untuk set selubung 6". Masuk selubung 6" dari permukaan hingga kedalaman 26,15 m (*casing shoe*) dan semen selubung 6".

Trayek 4" (lubang 5 $\frac{5}{8}$ "")

Operasi pengeboran trayek 4" dilaksanakan setelah proses penyemenan selubung 6" selesai dan mencapai keadaan kering. Langkah pertama adalah menyiapkan rangkaian *Bottom Hole Assembly* (BHA) yang terdiri dari HQ *Diamond Impregnated Bit*. Lubang dibersihkan dari *cutting* dengan *spooling*, lalu bor formasi (*coring*) dari kedalaman 32,45 hingga 152,45 m. Setelah itu, dilakukan sirkulasi untuk membersihkan lubang.

Persiapan untuk *reaming* dan pemasangan selubung 4" dilakukan dengan rangkaian BHA yang terdiri dari *tricone* bit 5 $\frac{5}{8}$ ", *Drill Collar* (DC), dan pipa T90 dengan panjang BHA 7,05 m. *Reaming* dilakukan dari kedalaman 23,35 hingga 146,35 m. Setelah itu, *flushing* lubang dilakukan untuk membersihkan lubang sumur sebelum persiapan selubung 4". selubung 4" diturunkan hingga kedalaman 146,35 m, dilas pada tiap sambungannya, dan sirkulasi lumpur dilakukan melalui selubung 4". Selanjutnya, bubur semen (*slurry*) sebanyak 1900 liter dengan *Specific Gravity* (SG) sebesar 1,7 dipompa ke dalam selubung 4". Tahap akhir adalah Tunggu Semen Kering (TSK) dan melakukan *top job* semen hingga tidak ada penurunan semen lagi.

Trayek Open Hole (lubang HQ)

Operasi pengeboran END-2 diakhiri dengan trayek open hole dengan ukuran HQ. Langkah pertama pada tahapan ini yaitu menyiapkan rangkaian BHA DB HQ. Pengeboran formasi (*coring*) dimulai dari kedalaman 152,45 s.d. 260,45 m. Pada interval kedalaman ini, terjadi kendala pengeboran berupa *Total Loss Circulation* (TLC) sebesar >100 lpm pada kedalaman 260 m, diatasi dengan memasukkan *Loss Circulation Material* (LCM). Kendala diatasi dengan memasukkan *Loss Circulation Material* (LCM), namun sirkulasi masih tergolong kecil (*Partial Loss Circulation*, PLC) 20-40 lpm. Pengeboran dilanjutkan

dari kedalaman 260,45 hingga 286,45 m, terjadi lagi TLC >100 lpm pada kedalaman 285 m. Setelah diatasi dengan LCM, PLC tetap 20-40 lpm. Pengeboran dengan kondisi PLC 20-40 lpm dilanjutkan dari kedalaman 286,45 hingga 502 m dengan kondisi PLC 20-40 lpm. *Logging* temperatur pada kedalaman 500 m. Tutup dan tinggalkan lubang sumur END-2, dilanjutkan reklamasi lahan.

GEOLOGI SUMUR

▪ Sumur END-1A

Litologi sumur END-1A dari permukaan sampai dengan kedalaman akhir (111,15 m) didominasi oleh batuan hasil aktivitas gunungapi, berdasarkan analisis megaskopis dari conto serbuk dan inti bor disusun oleh beberapa satuan, yaitu:

Soil (0-9,70 m): Tanah hasil pelapukan berbagai komponen andesit, teroksidasi, sangat lengket, mudah hancur, dengan warna coklat kemerahan hingga merah kecoklatan.

Breksi Tuf Terubah (BTT) (9,70-31,50 m): Batuan ini terdiri dari fragmen andesit dan matriks tuf dengan ukuran butir halus hingga kasar, berwarna abu-abu kecoklatan hingga coklat keabuan, dan memiliki kekerasan lunak-getas. Fragmen andesit berwarna abu-abu kemerahan hingga kehitaman, dengan tekstur porfiritik dan fenokris piroksen, kuarsa, feldspar, dan gelas vulkanik. Matriks tuf berwarna

putih kecoklatan hingga abu-abu kecoklatan.

Breksi Tuf (BT) (31,50-40,90 m):

Berupa breksi andesit dengan fragmen andesit dan matriks tuf, berwarna abu-abu kecoklatan, butir halus-kasar, dan kekerasan getas-keras. Fragmen andesit berwarna abu kehitaman dengan tekstur porfiritik, fenokris piroksen, kuarsa, feldspar, dan massa dasar afanitik gelas vulkanik. Matriks berupa tuf abu-abu kecoklatan.

Breksi Andesit (BA) (40,90-47,00 m): Mirip dengan BT, namun dengan fragmen andesit lebih dominan, berwarna abu-abu kecoklatan, ukuran butir halus-kasar, dan kekerasan getas-keras.

Breksi Andesit Terubah (BAT) (47,00-68,80 m dan 86,60-111,50 m): Berwarna abu-abu kehitaman hingga kehijauan, bentuk butir menyudut, terdapat urat kuarsa, dan kekerasan getas-keras. Fragmen andesit berwarna abu-abu kehijauan hingga kemerahan, dengan tekstur porfiritik dan fenokris piroksen, kuarsa, feldspar, dan gelas vulkanik. Matriks tuf berwarna putih keabuan hingga abu kecoklatan. Terdapat intensitas ubahan sedang (35%) dengan sebagian batuan terubah hidrotermal menjadi mineral lempung, kuarsa sekunder, kalsit, dan oksida besi.

Tuf Terubah (TT) (68,80-86,60 m): Berwarna abu-abu hingga kehijauan, disusun oleh abu vulkanik dengan ukuran < 2 mm, kekerasan getas. Batuan telah

teralterasi dengan intensitas ubahan sedang (30%) dan terdapat rekahan yang terisi oleh kuarsa.

Pada sumur END-1A, intensitas ubahan hidrotermal teridentifikasi dari kedalaman 0 m hingga 111,15 m. Batuan pada sumur ini menunjukkan intensitas ubahan yang bervariasi dari lemah hingga menengah, dengan nilai SM/TM berkisar antara 22% hingga 35%. Hasil identifikasi mineral sekunder mengungkapkan bahwa sumur END-1A mengalami ubahan hidrotermal bertipe sub propilitik. Tipe ubahan ini ditandai dengan kehadiran mineral sekunder seperti montmorilonit, illit, illit-smektit, albit, klorit, kuarsa, dan zeolit. Mineral sekunder tersebut umumnya terdapat pada litologi breksi tuf terubah, tuf terubah, dan breksi andesit terubah. Berdasarkan asosiasi mineral sekunder ini, diperkirakan temperatur pembentukan berada pada kisaran 125 hingga 200°C (Morrison, 1997) dengan fluida yang bersifat netral.

Kegiatan pengeboran sumur landaian suhu END-1A dengan kedalaman akhir yaitu 111,15 m, telah terjadi hilang sirkulasi lumpur pembilas sebagian (PLC). Hilang sirkulasi lumpur pembilas sebagian terjadi pada kedalaman 41,45 s.d. 46,45 m dan 69,30 s.d. 72,00 m yaitu sebanyak 10 s.d. 30 L/menit. Secara umum, kehadiran kekar-kekar gerus, dan rekahan-rekahan yang sebagian terisi oleh mineral lempung serta mineral kuarsa sekunder semakin

menguatkan adanya gejala struktur geologi pada sumur END-1A.

Pengukuran temperatur lumpur masuk (Tin) dan keluar (Tout) dilakukan pada kedalaman 0 hingga 111,15 m menunjukkan Tin berkisar antara 25,30 hingga 30,10°C dan Tout antara 25,90 hingga 31,40°C, dengan selisih 0,1 hingga 1,80°C. Selama pengeboran, beberapa kali ditemukan adanya aliran air dari kedalaman (*influx*) pada interval kedalaman 40 hingga 44 m dan 90 hingga 100 m. Adanya *influx* ini mempengaruhi pembacaan nilai temperatur pembilas dan temperatur sumur secara keseluruhan.

Ringkasan informasi mengenai parameter pengeboran dan geologi sumur pada kegiatan pengeboran END-1A disajikan melalui komposit log pada Gambar 3.

▪ Sumur END-2

Hasil analisis megaskopis batuan dari inti bor sumur END-2 hingga kedalaman 502 meter menunjukkan litologi yang didominasi oleh batuan hasil aktivitas vulkanik Gunung Endut. Berikut adalah satuan batuan yang ditemukan:

Soil (0-11,45 m): Hasil pelapukan dari berbagai komponen andesit yang sudah lapuk, teroksidasi, sangat lengket, dan mudah hancur. Warna tanah bervariasi dari coklat kemerahan, abu-abu kecoklatan, hingga merah kecoklatan.

Andesit Terubah (AT) (11,45-55,10 m, 147,70-181,60 m, 191,70-228,80

m, 245,50-313,30 m): Memiliki tekstur porfiritik dengan fenokris berupa mineral piroksen, plagioklas, hornblende, kuarsa, biotit, dan feldspar yang tertanam pada massa dasar afanitik berupa gelas vulkanik. Terdapat xenolith pada beberapa interval. Litologi andesit terubah memiliki kekar dan urat yang terisi oleh mineral kalsit, kuarsa sekunder, pirit, dan mineral lempung. Intensitas ubahan berkisar dari lemah hingga menengah (20%-55%).

Breksi Andesit Terubah (BAT) (55,10-147,70 m): Berwarna abu-abu, abu keputihan, abu kehijauan, abu kehitaman, kekuningan, dan kemerahan, keras, dengan bentuk butir menyudut dan sortasi buruk. Matriks berupa batuan andesit. Breksi andesit terubah memiliki rekahan yang terisi oleh mineral kalsit dan kuarsa sekunder, dan pada beberapa interval terjadi silisifikasi. Intensitas ubahan menengah (40%).

Tuf Terubah (TT) (181,60-191,70 m): Tersusun oleh material abu vulkanik berukuran halus (<1 mm), berwarna abu-abu hingga abu keputihan. Batuan ini keras, dengan pemilahan sedang dan kemas tertutup. Intensitas ubahan lemah (20%) dengan rekahan yang terisi mineral kalsit.

Breksi Vulkanik Terubah (BVT) (228,80-245,50 m, 313,30-404,30 m, 439,80-488,45 m, 499,85-502,00 m): Berwarna abu-abu, abu kehitaman, abu keputihan, dan sedikit kehijauan, menyudut dan keras. Tersusun oleh fragmen andesit

basaltik berukuran <50 cm dengan matriks vulkanik. Ditemukan mineral kuarsa pada beberapa interval. Intensitas ubahan lemah hingga menengah (20%-55%).

Diorit (D) (385,00-404,00 m, 410,00-440,00 m): Berwarna abu-abu, abu keputihan, dan hitam, keras dan kompak, dengan tekstur faneritik terdiri dari plagioklas, biotit, piroksen, dan kuarsa. Terdapat lapisan kuarsa tebal ± 40 cm. Intensitas ubahan lemah hingga menengah (25%-35%) dengan rekahan yang terisi kalsit dan kuarsa sekunder.

Andesit Basaltik Terubah (ABT) (404,30-410,40 m, 488,45-499,85 m): Berwarna abu-abu, abu kehitaman, abu kehijauan, hitam, hitam keabuan, hitam kehijauan, dan sedikit kemerahan. Memiliki tekstur afanitik-porfiritik dengan fenokris berupa piroksen, hornblende, biotit, plagioklas, dan kuarsa pada massa dasar gelas vulkanik. Rekahan terisi oleh mineral kalsit dan kuarsa sekunder. Intensitas ubahan lemah hingga menengah (20%-40%).

Sumur landaian suhu END-2 dengan kedalaman akhir yaitu 502,00 m, telah terjadi hilang sirkulasi lumpur pembilas sebagian (*partial loss circulation*) dan hilang sirkulasi lumpur seluruhnya (*total loss circulation*). Hilang sirkulasi lumpur pembilas sebagian terjadi pada kedalaman 286,45 s.d. 314,45 m, 321,00 s.d. 356,00 m dan 356 s.d. 431,00 m yaitu sebanyak 10 s.d. 30 liter per menit. Sedangkan, hilang sirkulasi lumpur

seluruhnya terjadi di kedalaman 8,45 s.d. 12,45 m dan 281,45 s.d. 286,45 m dengan jumlah lebih dari 100 liter per menit. Selain itu, kehadiran kekar-kekar gerus dan rekahan-rekahan yang sebagian terisi oleh mineral lempung serta kuarsa sekunder.

Intensitas ubahan yang terdapat pada sumur END-2, dapat teridentifikasi mulai dari kedalaman 0 m s.d. 502 m. Batuan yang terdapat pada sumur END-2 telah mengalami ubahan hidrotermal dengan intensitas ubahan lemah sampai menengah (SM/TM = 20% s.d. 55%). Hasil identifikasi mineral sekunder pada sumur END-2 menunjukkan adanya ubahan hidrotermal bertipe argilik yang dicirikan dengan kehadiran montmorilonit, illit, kaolinit, pirit, kuarsa dan kalsit. Secara umum, keberadaan mineral sekunder tersebut terdapat pada litologi andesit terubah, breksi andesit terubah, tuf terubah dan breksi vulkanik terubah. Berdasarkan kehadiran asosiasi mineral sekunder yang terdapat pada sumur END-2, diperkirakan memiliki temperatur pembentukan sekitar 100 s.d. 200°C (Reyes, 1990 dan Hedenquist, 2000) dengan fluida yang bersifat asam hingga netral.

Hasil pengukuran temperatur lumpur masuk (Tin) dan temperatur keluar (Tout) sumur END-2, dimulai dari kedalaman 0 s.d. 61,80 m diperoleh pengukuran temperatur lumpur masuk (Tin) berkisar antara 25,10 s.d. 33,60°C dan temperatur keluar (Tout) berkisar antara 25,50 s.d. 36,60°C, dengan selisih

temperatur masuk dan keluar sebesar 0,1 s.d. 2,40°C. Selisih temperatur masuk dan keluar yang kurang dari 5°C, menunjukkan belum adanya anomali temperatur pada sumur.

Ringkasan informasi mengenai parameter pengeboran dan geologi sumur pada kegiatan pengeboran END-2 disajikan melalui komposit log pada Gambar 4.

LOGGING TEMPERATUR

▪ **Sumur END-1A**

Pengukuran *logging* temperatur lubang sumur END-1A hanya dapat dilakukan pada kedalaman 77 meter, hal tersebut dikarenakan adanya *hole problem* sebagai akibat adanya runtuhnya formasi. Pada pengukuran *logging* tersebut dilakukan perendaman *T-Logging Tool* di kedalaman 77 meter selama 1 jam. Berdasarkan hasil *logging* tersebut, diperoleh temperatur di permukaan tanah/posisi kedalaman sama dengan nol terukur sebesar 25,9°C. Sedangkan, pada dasar lubang bor (77 meter) temperatur sebelum direndam 33,15°C dan setelah direndam temperatur terukur terbaca sebesar 33,72°C.

▪ **Sumur END-2**

Pengukuran *logging* temperatur pada lubang sumur bor END-2 dilakukan pada kedalaman 150 m dan 500. *Logging* temperatur tahap pertama dilakukan pada kedalaman 150,95 m dengan melakukan

pengukuran temperatur (*T-Logging*) mulai permukaan sampai kedalaman 150,95 m dengan kecepatan rata-rata 5 meter per menit, temperatur terukur sebesar 34,81°C, rendam *T-Logging Tool* selama 1 jam, temperatur terbaca sebesar 34,93°C. Cabut *T-Logging Tool* ke permukaan dengan kecepatan 5 meter per menit.

Logging temperatur tahap kedua dilakukan di kedalaman 500 m, dilakukan pengukuran temperatur (*T-Logging*) mulai permukaan sampai kedalaman 500 m dengan kecepatan rata-rata lima (5) meter per menit, temperatur terukur sebesar 70,61 °C, rendam *T-Logging Tool* selama 1 jam, temperatur terbaca sebesar 74,47 °C. Cabut *T-Logging Tool* ke permukaan dengan kecepatan lima (5) meter per menit.

PEMBAHASAN

▪ **Sumur END-1A**

Sumur END-1A yang memiliki kedalaman hingga 111,15 meter diperkirakan terdiri dari batuan vulkanik Gunung Endut. Interaksi fluida hidrotermal dengan batuan sekitarnya menyebabkan ubahan hidrotermal bertipe sub-propilitik dengan intensitas lemah hingga menengah (22-35%). Mineral-mineral ubahan yang ditemukan, seperti montmorilonit, illit, albit, dan klorit, menunjukkan interaksi dengan fluida hidrotermal ber-pH netral dan suhu pembentukan tinggi (>180°C). Kehadiran stilbit mengindikasikan pendinginan akibat air meteorik.

Pengeboran sumur END-1A mengonfirmasi data magnetotellurik tentang lapisan batuan dengan tahanan jenis rendah ($<10 \text{ Ohm.m}$) di daerah Gunung Endut, yang didominasi mineral lempung dan berperan sebagai caprock. Analisis *Methylene blue* menunjukkan keberadaan *clay* (montmorilonit) di kedalaman 10-20 m dan 40-111,15 m. Sumur ini juga mengalami dua kali hilang sirkulasi parsial, menandakan porositas dan permeabilitas tinggi.

Pengukuran temperatur formasi dengan metode Horner Plot menunjukkan temperatur $44,18^\circ\text{C}$ pada kedalaman 77 meter dan *gradient thermal* $23,74^\circ\text{C}/100 \text{ meter}$ (Gambar 5). Data magnetotellurik 2021 memprediksi top reservoir pada kedalaman sekitar 700 meter dengan temperatur sekitar 190°C . Kehadiran alterasi hidrotermal dan anomali *gradient thermal* menunjukkan sumur END-1A berada di daerah prospek panas bumi Gunung Endut, khususnya di bagian barat daerah prospek *hidden geothermal*.

▪ Sumur END-2

Sumur END-2 hingga kedalaman 502 m didominasi oleh produk vulkanik Gunung Endut. Mineral ubahan yang hadir menunjukkan interaksi antara fluida hidrotermal dan batuan sekitarnya, dengan ubahan hidrotermal tipe argilik (intensitas 20-55%). Mineral seperti montmorilonit, illit, kaolinit, pirit, kuarsa, dan kalsit

menunjukkan kondisi larutan pH netral hingga asam. Illit, yang terbentuk pada suhu $>180^\circ\text{C}$, diduga sebagai fosil mineral dari masa lampau, didukung oleh pengukuran temperatur *logging* yang rendah akibat pendinginan oleh air meteorik, ditandai oleh siderit yang mengindikasikan adanya akuifer dingin.

Sumur END-2 mengalami hilang sirkulasi parsial di beberapa interval kedalaman dan hilang sirkulasi total di kedalaman lainnya, menunjukkan adanya rekahan/kekar intensif pada formasi batuan akibat deformasi. Pengukuran *logging* temperatur dilakukan melalui perhitungan metode Horner Plot agar diperoleh harga temperatur formasi (*Initial Temperature*). Temperatur formasi menunjukkan $37,15^\circ\text{C}$ pada kedalaman 150 m dan $81,39^\circ\text{C}$ pada 500 m, dengan gradien termal $11,1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ atau sekitar empat (4) kali gradien rata-rata bumi (Gambar 5).

Hasil penyelidikan terdahulu menunjukkan perkiraan reservoir panas bumi di Gunung Endut (prospek Cikawah) berada di kedalaman sekitar 1000 m, hasil interpolasi gradien termal pada kedalaman 1000 m tersebut adalah 138°C . Namun, survei geokimia 2021 menunjukkan hasil geotermometer sebesar 180°C , yang membutuhkan kedalaman hingga $\pm 1400 \text{ m}$. Hal ini mengindikasikan bahwa sumur END-2 mungkin berada di batas pinggir daerah prospek (marginal).

KESIMPULAN

Sumur landaian suhu END-1A (111,15 m) dan END-2 (502,00 m) dengan litologi didominasi oleh batuan vulkanik Gunung Endut. Litologi dari kedua sumur ini telah mengalami ubahan hidrotermal dengan intensitas ubahan hidrotermal lemah hingga menengah (SM/TM = 20-55%) dengan tipe ubahan sub-propilitik pada sumur END-1A dan tipe ubahan argilik untuk sumur END-2

Temperatur formasi END-1A di kedalaman akhir 111,15 m sebesar

44,18°C dengan nilai rata-rata landaian suhu sebesar 23,74°C/100 m, sedangkan formasi END-2 di kedalaman akhir 502,00 m sebesar 81,39°C, dengan nilai rata-rata landaian suhu sebesar 11,1°C/100 m. Perkiraan temperatur top reservoir di kedalaman 1000 m berdasarkan initial temperatur yang linier sekitar 138°C yang termasuk ke dalam temperatur sedang (*medium enthalpy*). Hal ini menunjukkan bahwa prospek Gunung Endut menjanjikan untuk dikembangkan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

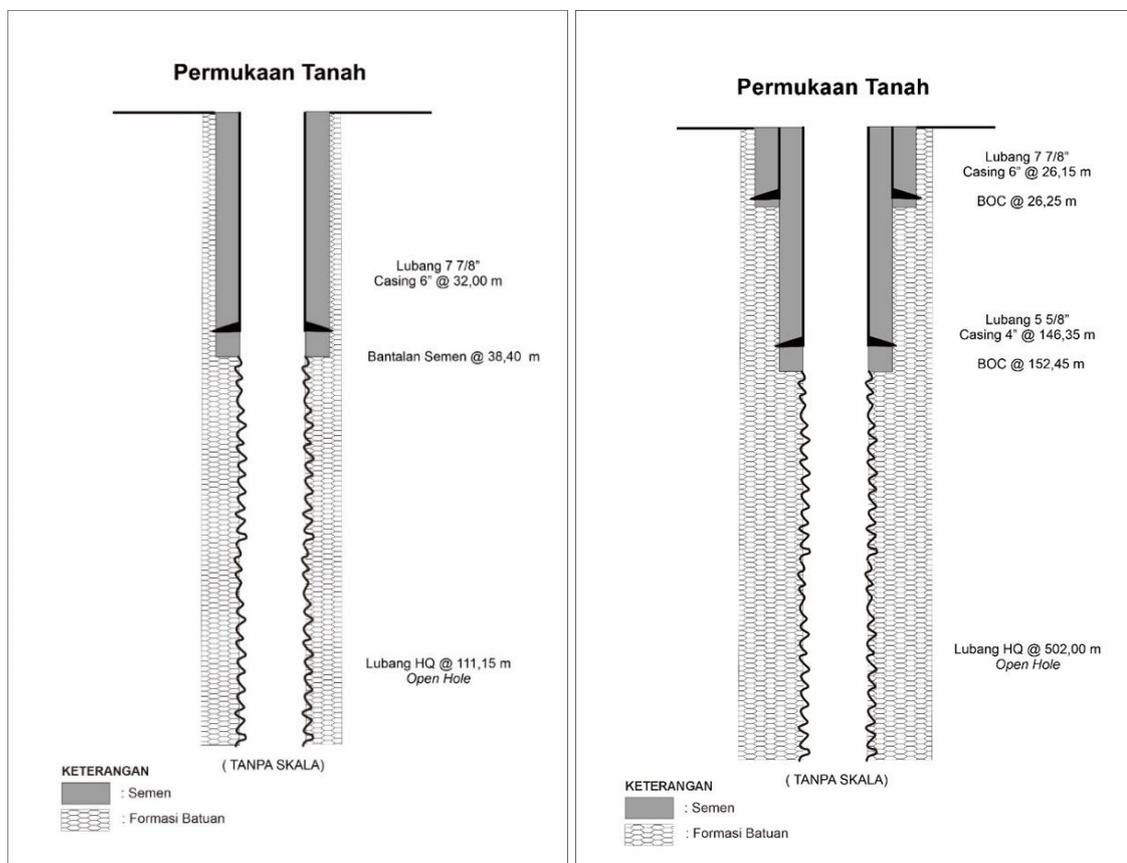
- Badan Geologi, 2020, Peta Sumber Daya Panas Bumi Indonesia Status tahun 2020, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung
- Deere, D, U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology.
- Gunderson, R., Cumming, W., Astra, D., and Harvey, C. 2000. *Analysis of smectite clays in geothermal drill cuttings by the methylene blue method: for well site geothermometry and resistivity sounding correlation*. Proceedings World Geothermal Congress.
- Rezky, Y., Kusnaedi, D., Suhanto, D., 2006. Penelitian Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Gunung Endut, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Bandung.
- Sugianto, A., 2008. Survei *Magnetotelluric* Daerah Panas Bumi Gunung Endut, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Bandung
- Taqodama, I dan Dewi, R., 2021. Survei Magnetotellurik (MT) dan *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) Daerah Panas Bumi Gunung Endut, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Bandung.
- Morrison, K., 1997. Important Hydrothermal Minerals and Their Significance 7th Edition. Geothermal and Mineral Service Division. Kingston Morrison Limited.
- Moore, D.M. dan Reynolds, Jr, R.C., 1997. X-Ray Diffraction and The Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, 332 hal.

Menzies, A.J., 1979. *Transient pressure testing*. In: Proceedings the First New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand

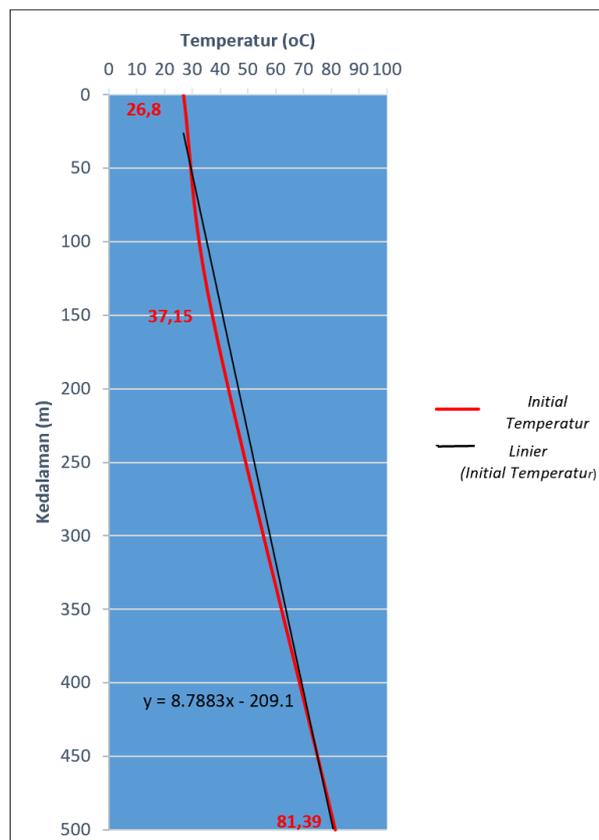
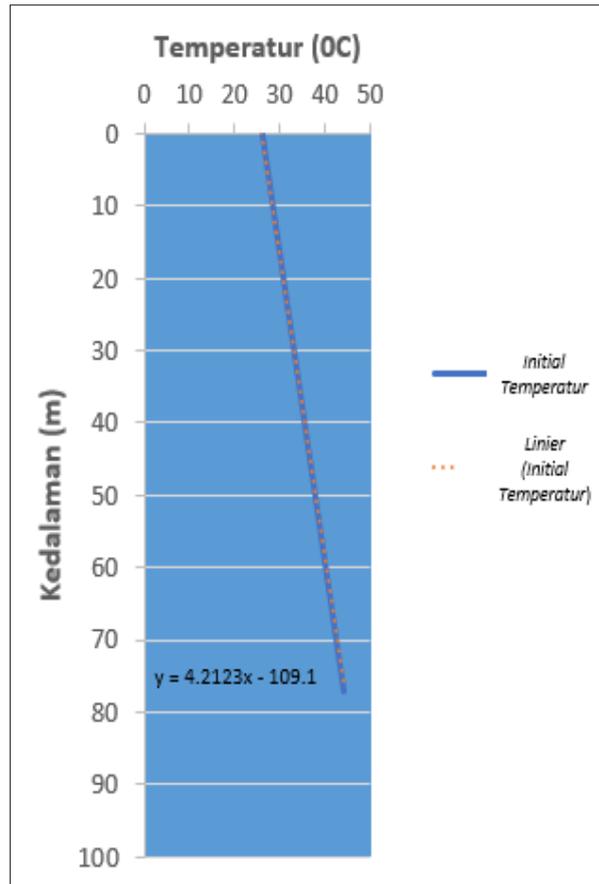
Tim Integrasi Data Geosains, 2021. Laporan Integrasi Data Geosains Daerah Panas Bumi Gunung Endut Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi



Gambar 1. Lokasi Survei Landaian Suhu Gunung Endut



Gambar 2. Konstruksi Sumur END-1A (kiri) dan END-2 (kanan) tanpa skala



Gambar 4. Gradien Landaian Suhu END-1A (kiri) dan END-2 (kanan)

**SURVEI RINCI GEOLOGI, GEOKIMIA, GAYA BERAT DAN AUDIO MAGNETOTELLURIK
DAERAH PANAS BUMI MUARO PAITI, KABUPATEN LIMA PULUH KOTA,
PROVINSI SUMATERA BARAT**

Lano Adhitya Permana, Andri Eko Ari Wibowo, dan Husin Setia Nugraha

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Indikasi keberadaan sistem panas bumi di daerah Muaro Paiti dicirikan oleh kehadiran mata air panas bertemperatur 34°C s.d 65°C. Secara geologi, daerah Muaro Paiti berada pada lingkungan cekungan sedimen dengan didominasi oleh kehadiran batuan berumur Miosen Awal hingga Miosen Tengah. Keberadaan struktur geologi yang terdapat di daerah Muaro Paiti, umumnya berarah baratlaut-tenggara dan utara – selatan dan diduga dapat berperan sebagai pengontrol kemunculan manifestasi panas bumi di daerah survei. Karakteristik mata air panas di daerah Muaro Paiti memiliki tipe bikarbonat, pH relatif basa, kaya akan unsur HCO₃ dan memiliki temperatur bawah permukaan hasil perhitungan geotermometer sebesar 110 s.d 150 °C. Hasil pemodelan gaya berat menunjukkan adanya kesamaan dengan model struktur geologi berupa adanya sinklin di daerah survei.

Sistem panas bumi daerah Muaro Paiti diperkirakan berkaitan dengan cekungan sedimen yang disertai adanya pengaruh *thermal gradient* dan kontrol struktur. Estimasi sumber daya energi panas bumi di daerah Muaro Paiti sebesar 2 Mwe pada kelas sumberdaya hipotetik yang dapat memberikan peluang untuk digunakan sebagai pemanfaatan langsung.

Kata kunci: muaro paiti, cekungan sedimen, mata air panas

PENDAHULUAN

Secara administratif, daerah Muaro Paiti berada dalam Kecamatan Kapur IX, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat. Secara geologi, daerah Muaro Paiti terletak pada Cekungan Sumatera Tengah yang merupakan cekungan belakang busur (*back arc basin*), dalam hal ini cekungan belakang busur terbentuk dari hasil proses penunjaman

lempeng samudera Hindia terhadap lempeng benua Eurasia pada kala Eosen – Oligosen sehingga memiliki bentuk struktur geologi yang cukup kompleks dan menarik untuk diteliti, terutama terkait keterdapatannya adanya manifestasi panas bumi yang terletak di Cekungan Sumatera Tengah.

Kegiatan penyelidikan rinci di daerah Muaro Paiti dimaksudkan untuk memperoleh data geologi, geokimia, dan

data geofisika secara lebih rinci, terutama yang berkaitan dengan aspek kepanasbumian. Sedangkan, tujuan dari survei rinci ini yaitu untuk mengetahui karakteristik sistem panas bumi di daerah Muara Paiti berikut prospek dan rekomendasi kelayakan pengembangan pemanfaatannya.

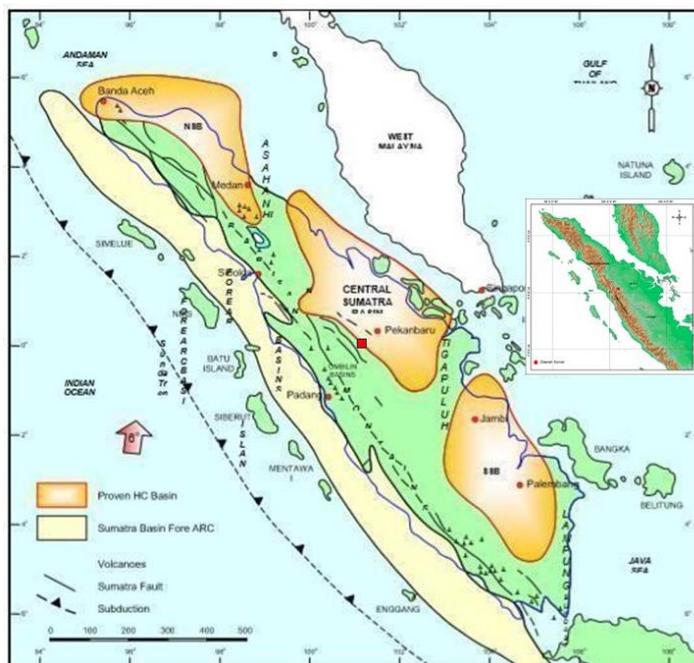
METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penyelidikan rinci di daerah Muaro Paiti berupa metode geologi, geokimia dan geofisika. Metode geologi digunakan untuk mengetahui sebaran batuan, struktur geologi dan karakteristik fisik manifestasi. Sedangkan, metode geokimia dilakukan untuk mengetahui karakteristik fluida. Sementara itu metode geofisika digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan beserta sebaran sifat fisika batuan.

GEOLOGI REGIONAL

Secara tektonik, Cekungan Sumatera Tengah terbentuk selama Tersier Awal (Eosen-Oligosen), sedangkan proses pengendapan sedimennya dimulai pada Eosen – Pliosen. Struktur geologi yang berkembang di wilayah ini yaitu terdiri dari dua pola sesar utama yang berarah utara - selatan dan barat laut – tenggara.

Cekungan Sumatera Tengah terletak berbatasan dengan Bukit Barisan pada bagian baratdaya, Busur Asahan pada bagian utara dan terdapat Tinggian Tigapuluh pada bagian selatan (Gambar 1). Cekungan ini memiliki tektonik aktif yang searah dengan Pulau Sumatera yaitu baratlaut. Di sepanjang singkapan yang berada pada cekungan ini memperlihatkan bentukan *strike-slip fault* (Hedrick dan Aulia,1993).



Gambar 1. Batas Cekungan Sumatera Tengah (Hedrick dan Aulia, 1993)

HASIL ANALISIS

MANIFESTASI PANAS BUMI

Secara umum, kemunculan manifestasi mata air panas di daerah survei berada di sepanjang Sungai Kapur. Empat conto mata air panas diperoleh dari kelompok mata air panas Muaro Paiti, sedangkan dua conto air panas diperoleh dari kelompok mata air panas Lubuk Panjang. Sementara itu, terdapat masing-masing satu conto mata air panas yang berasal dari kelompok mata air panas Batu Bobok dan mata air panas Sumanio. Secara lengkap, keterdapatan sebaran manifestasi dan karakteristik mata air panas daerah survei dapat dilihat pada tabel 1.

GEOLOGI

Clarke M.C.G., dkk. (1982) menyebutkan bahwa hasil pemetaan geologi regional lembar Pekanbaru di

daerah Muaro Paiti dan sekitarnya, terdapat urutan stratigrafi dari tua ke muda, yaitu : Formasi Kuantan (Puku), Anggota Tanjungpauh (Pukt), Formasi Bohorok (Pub), Formasi Sihapas (Tms), Formasi Telisa (Tmt), Gunung Api Minor yang Tak

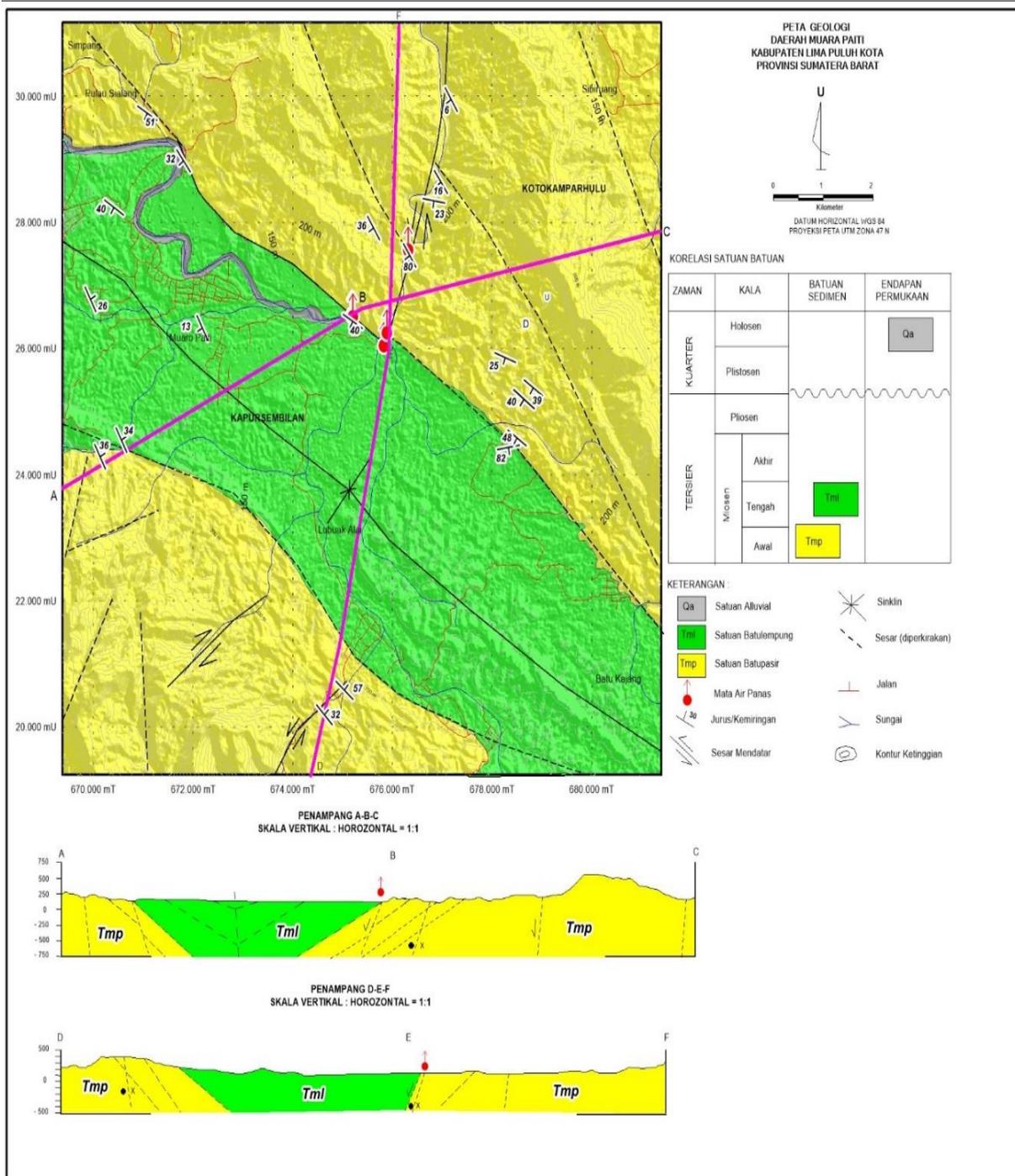
Teruraikan (QTV), dan alluvium muda (Qh). Sedangkan, hasil pemetaan geologi rinci yang telah dilakukan oleh Anonim, dkk (2023) menjelaskan bahwa di daerah survei hanya terdiri dari Satuan Batupasir yang tergolong dalam Formasi Sihapas yang berumur Miosen Awal, lalu terdapat Satuan Batulempung yang termasuk dalam Formasi Telisa yang berumur Miosen Awal-Miosen Tengah dan diperkirakan diendapkan pada lingkungan laut yaitu disekitar bagian neritik tengah - batial atas, serta terdapat Satuan Endapan Alluvial yang merupakan endapan sekunder hasil rombakan batuan di permukaan yang telah terbentuk sebelumnya.

Tabel 1. Manifestasi permukaan di daerah Muaro Paiti

NO	MANIFESTASI PANAS BUMI	KOORDINAT		ELEVASI (m)	SUHU AIR (°C)	DEBIT (lt/dtk)	pH	DHL (µS/cm)	KETERANGAN
		(mT)	(mS)						
1	AP Muaro Paiti 1	675175	26543	121	57.4	0.2	6.12	495	Air panas berasa besi, jernih, keluar dari rekahan batuan pasir di dinding sungai Sungai Kapur. Terdapat oksida besi di tempat keluarnya mata air panas.
2	AP Muaro Paiti 2	675200	26528	120	61.2	1	5.64	368	Air panas jernih, terdapat gelembung gas, terdapat sedikit lapisan minyak di permukaan, berada dipinggir Sungai Kapur, dimanfaatkan sebagai pengisi kolam.
3	AP Muaro Paiti 3	675205	26527	119	65.2	0.5	6.28	460	Air panas jernih, terdapat gelembung gas yang lebih banyak dan intens dibanding APMP 2, muncul di pinggir Sungai Kapur yang dimanfaatkan sebagai pengisi kolam pemandian. Terdapat oksida besi yang cukup tebal dan terdapat sedikit lapisan minyak di permukaan.
4	AP Muaro Paiti 4	675824	26065	115	39.9	0.1	6.28	66	Air panas sedikit keruh, berada di Timur Sungai Kapur, keluar dari pipa kecil yang tertampung dalam kolam.
5	AP Lubuk Panjang 1	675896	26286	122	49.9	0.1	6.57	173.8	Mata Air Panas keluar dari batuan pasir di sisi barat Tebing Sungai Kapur. Terdapat oksida besi yang cukup pekat.
6	AP Lubuk Panjang 2	676171	26726	125	42.8	0.2	6.66	231	Mata air panas keluar dari batuan pasir disisi barat tebing Sungai Kapur. Terdapat oksida besi, air jernih dan berasa besi.
7	AP Batu Bobok	676019	26391	121	34	0.05	6.02	81	Mata air panas keluar dari celah batuan pasir disisi timur Sungai Kapur. Terdapat oksida besi, air jernih dan berasa besi.
8	AP Sumanio	676310	27584	103	41.7	0.1	6.1	-	Manifestasi tidak dapat diambil karena terendam air pasang sungai. Data menggunakan hasil Survei Pendahuluan.

Hasil observasi lapangan pada daerah survei menunjukkan adanya struktur sesar dan lipatan yang relatif berarah utara baratlaut – selatan tenggara dan timurlaut – baratdaya dengan jenis struktur geologi berupa sesar mendatar

mengiri, sesar normal, lipatan sinklin dan sesar mendatar mengangan. Secara ringkas, jenis sebaran batuan dan struktur geologi daerah survei dapat dilihat pada peta geologi (Gambar 2).

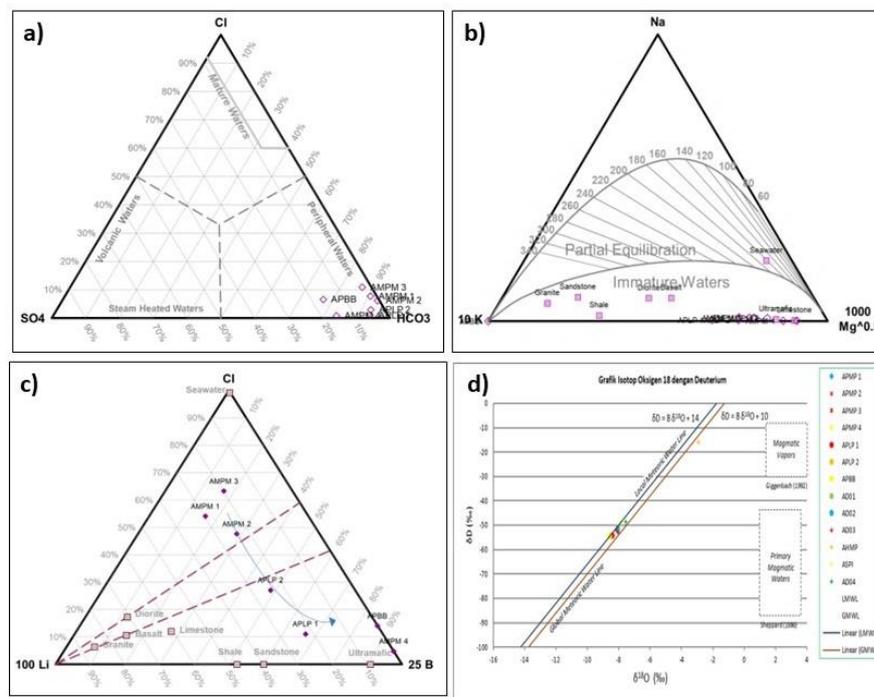


Gambar 2. Peta geologi daerah Muara Paiti

GEOKIMIA

Karakteristik dan tipe air panas dapat diketahui dengan melakukan *plotting* komposisi kimia dari mata air panas pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg, dan Cl-Li-B yang mengacu kepada Giggenbach (1988). Berdasarkan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 3.a) memperlihatkan bahwa seluruh contoh air panas daerah panas bumi Muaro Paiti bertipe bikarbonat dengan komposisi klorida yang rendah (<22 ppm). Plotting Na-K-Mg pada seluruh sampel air panas berada di zona *immature water* yang mengindikasikan pemunculan air panas sangat dipengaruhi oleh air meteorik (Gambar 3.b). Pada diagram segitiga Cl-Li-B fluida Muaro Paiti berada pada zona Cl yang mengarah ke zona B yang dapat

diasumsikan bahwa lingkungan pembentukan berupa lingkungan vulkanik yang dipengaruhi batuan sedimen (Gambar 3.c). Hasil diagram segitiga tersebut juga mengindikasikan semua mata air panas berasal dari reservoir yang sama. Sementara itu, berdasarkan hasil isotop ¹⁸O dan Deuterium yang diperoleh dari sampel mata air panas daerah Muaro Paiti dan dilakukan plotting ke dalam diagram hubungan antara Oksigen-18 dan Deuterium, terletak di dekat garis air meteorik (*meteoric water line*) (Gambar 3.d). Pergeseran yang tidak terlalu signifikan diasumsikan bahwa pengkayaan yang terjadi sedikit dan dapat diasumsikan bahwa fluida reservoir berada pada kedalaman yang dangkal ataupun temperatur yang tidak tinggi.



Gambar 3. a) Diagram Cl-SO₄-HCO₃; b) Diagram NA-K-Mg; c) Diagram Cl-Li-B; d) Diagram Isotop

GAYA BERAT

Secara umum, pola anomali pola anomali bouguer terkait erat dengan distribusi batuan penyusun daerah Muaro Paiti. Hal tersebut tampak sebaran anomali bouguer dengan nilai lebih besar dari 6 mgal memperlihatkan kecenderungan meninggi di timurlaut dan sedikit sebelah barat daya, pola ini kemungkinan merupakan respon dari batupasir. Sedangkan anomali rendah dengan nilai dibawah 6 mgal mengisi bagian tengah, dengan pola memanjang tenggara – baratlaut pola ini diperkirakan merupakan respon dari batulempung (Gambar 4).

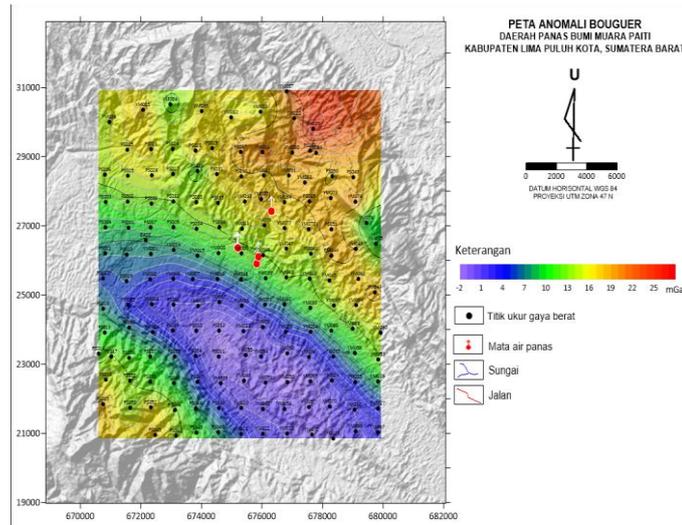
Anomali residual dan regional diperoleh dengan menggunakan metode filter polinomial orde 1. Anomali regional (Gambar 5) menunjukkan pola nilai yang tinggi di utara dan cenderung merendah ke selatan. Sedangkan, hasil anomali residual (Gambar 6) memperlihatkan pola yang sama dengan anomali bouguer dimana nilai densitas tinggi di sebelah timurlaut dan baratdaya. Sementara itu, anomali rendah dengan nilai < -1 mgal berada di tengah daerah penyelidikan dengan pola memanjang baratlaut - tenggara pola ini diperkirakan merupakan respon dari batulempung.

Hasil pemodelan 2,5D (Gambar 7) memperlihatkan adanya kesamaan dengan model dari geologi, dimana densitas

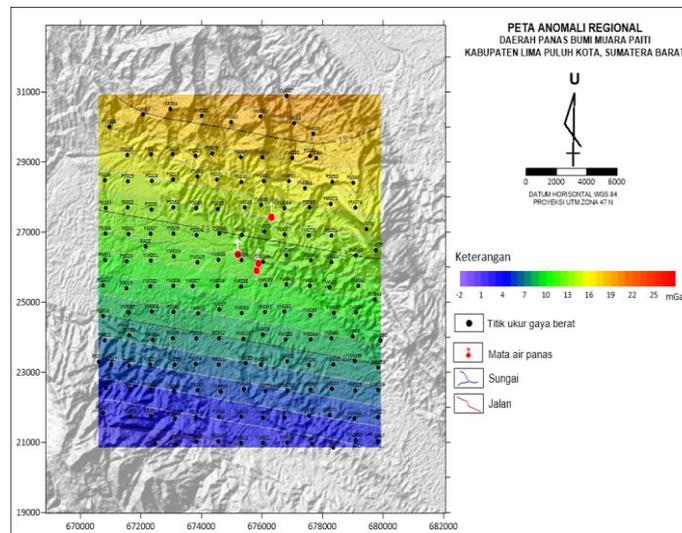
rendah kurang dari $2,2 \text{ g/m}^3$ yang diperkirakan batulempung berada di bagian tengah membentuk cekungan berupa sinklin, sementara batupasir berada di bagian bawah dan mengisi bagian utara dan selatan dengan nilai densitas lebih dari $2,2 \text{ g/m}^3$. Mata Air Panas Muaro Paiti berada pada sekitar densitas $2,7 \text{ g/m}^3$ yang juga terdapat struktur berdasarkan informasi geologi permukaan dan peta *First Horizontal Derivative*.

AUDIOMAGNETOTELLURIK

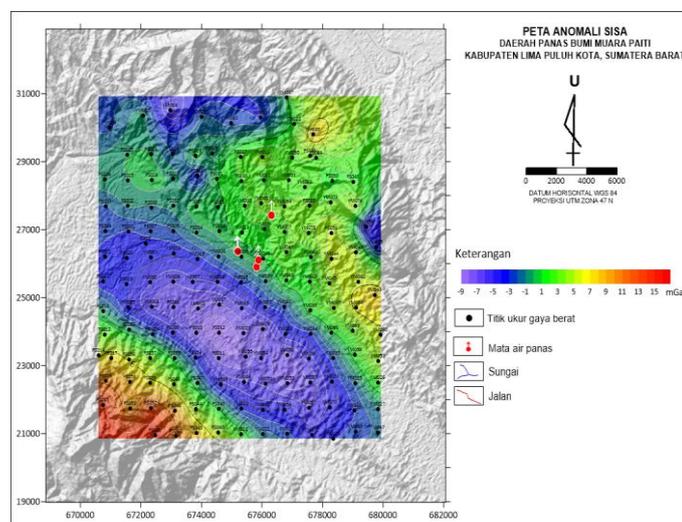
Hasil analisis audiomagnetotellurik menunjukkan adanya keberadaan lapisan bertahanan jenis rendah $< 10 \text{ Ohm-m}$ dibagian tengah meluas ke arah baratdaya (Gambar 8) hingga kedalaman rata-rata sekitar 500 – 600 m (Gambar 4.4) diduga sebagai respon batulempung berumur Miosen Awal yang merupakan bagian dari Formasi Telisa, atau dengan kata lain bukan merupakan respon dari lapisan penudung (*claycap*) dari sistem panas bumi tersebut. Proses tektonisme pada tepi basin Sumatera Tengah memaksa formasi batuan sedimen (batupasir) yang bersifat *ductile* untuk memendek secara horizontal dan memaksa batuan untuk menekuk menghasilkan struktur lipatan dan hasil dari deformasi struktur batupasir dan batulempung dalam kurun waktu sangat lama.



Gambar 4. Peta Anomali Bouguer



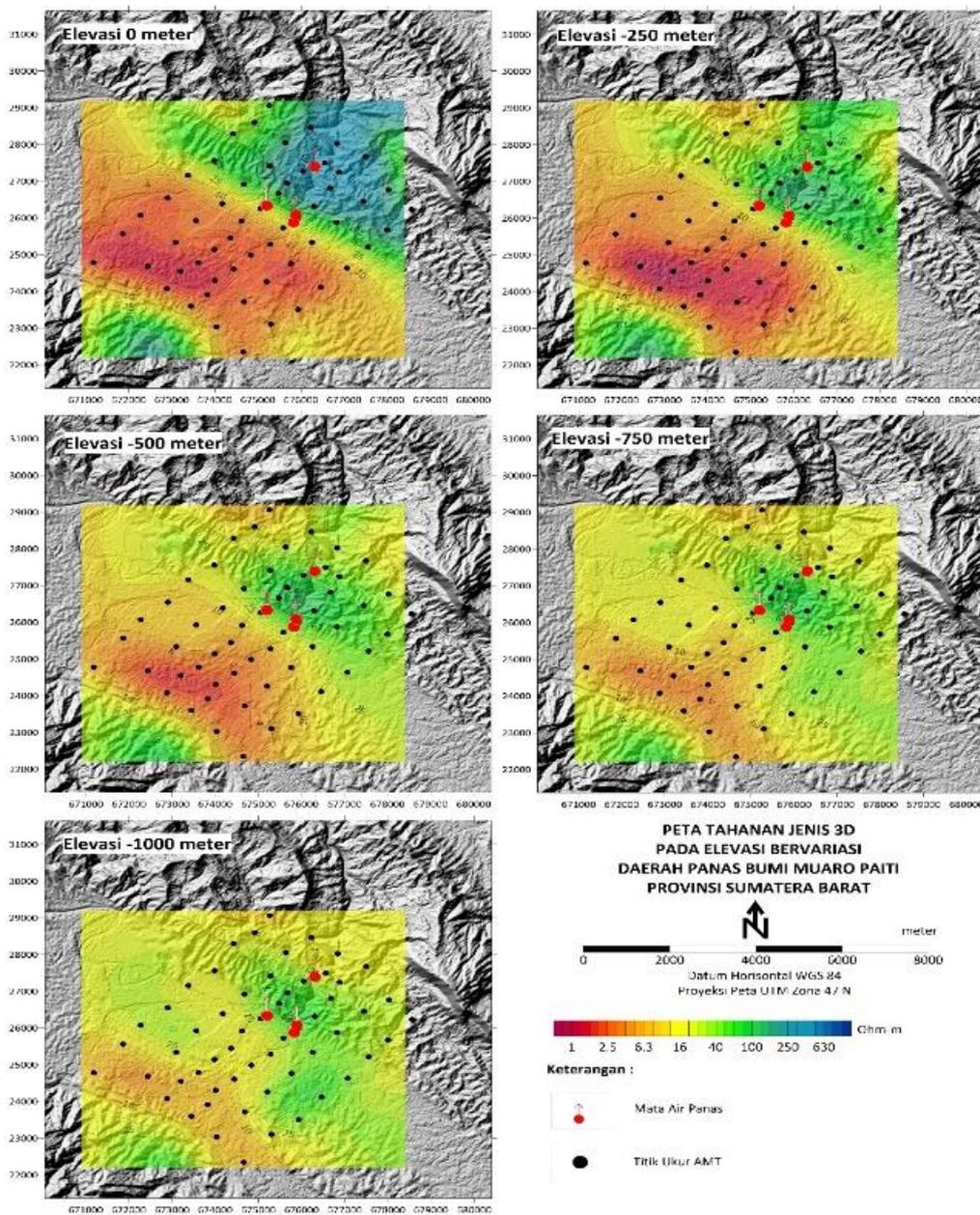
Gambar 5. Peta Anomali Regional



Gambar 6. Peta Anomali Residual



Gambar 7. Hasil Pemodelan 2,5D



Gambar 8. Peta tahanan jenis batuan pada elevasi yang bervariasi

PEMBAHASAN

Kondisi geologi daerah Muaro Paiti yang berada di Cekungan Sumatera Tengah menunjukkan bahwa daerah survei memiliki keterkaitan dengan pembentukan sistem panas bumi pada cekungan sedimen. Hal tersebut didukung oleh data audiomagnetotellurik yang menjelaskan bahwa keberadaan lapisan bertahanan jenis rendah <10 Ohm-m dibagian tengah meluas ke arah baratdaya hingga kedalaman rata-rata sekitar 500 – 600 m merupakan respon dari batuan sedimen, sehingga dapat dikatakan bahwa lapisan bertahanan jenis rendah bukan merupakan respon dari lapisan penudung (*claycap*) dari sistem panas bumi tersebut.

Grysen, dkk (2016) menyebutkan bahwa berdasarkan data temperatur yang berasal dari ratusan lubang sumur pengeboran di sekitar Cekungan Sumatera Tengah memperlihatkan bahwa terdapat aliran panas sebesar 77 mW.m^{-2} s.d 369 mW.m^{-2} dan *gradient thermal* sebesar 35° C/km hingga 191° C/km . Sedangkan, Eubank dan Makki (1981) menjelaskan bahwa tingginya *gradient geothermal* di Cekungan Sumatera Tengah disebabkan oleh adanya pergerakan kerak yang menembus ke mantel bagian atas. Hal tersebut dapat menguatkan bahwa keberadaan mata air panas di daerah Muara Paiti diperkirakan dipengaruhi oleh adanya *gradient thermal* dan aliran panas (*heat flow*) yang tinggi serta adanya kontrol struktur.

Sistem panas bumi pada cekungan sedimen dapat berasosiasi dengan sistem sirkulasi dalam (*deep circulation*), dimana fluida panas yang ada hanya sebagai bagian dari proses sirkulasi. Fluida panas pada sistem panas bumi daerah Muara Paiti merupakan fluida panas yang kaya akan unsur HCO_3 . Fluida panas tersebut bergerak menuju permukaan melalui media berupa zona patahan hingga akhirnya tiba di permukaan sebagai mata air panas. Selama perjalanannya menuju ke permukaan, fluida panas tersebut berinteraksi juga dengan batuan yang dilaluinya dan mengalami kontaminasi dengan air permukaan. Hal tersebut tampak dari tingginya kandungan HCO_3 dan Mg dalam air panasnya.

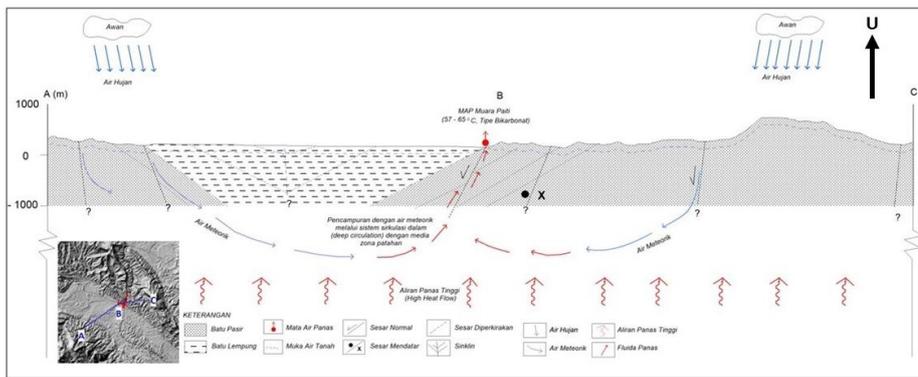
Temperatur bawah permukaan di daerah Muara Paiti berdasarkan perhitungan geotermometer K-Mg diperkirakan sekitar 110°C s.d 150°C yang dapat digolongkan kedalam temperatur rendah hingga menengah.

Berdasarkan hasil analisis integrasi data geosains yang telah dilakukan, maka dapat diindikasikan bahwa mata air panas Muara Paiti berhubungan dengan cekungan sedimen (Gambar 9). Pembentukan sistem panas bumi di cekungan sedimen berkaitan juga dengan sistem sirkulasi dalam (*extention-driven*) yang merupakan hasil dari sirkulasi dalam air meteorik di sepanjang zona sesar atau zona rekahan pada daerah yang memiliki *heat flow* yang tinggi (Anderson dan Lund,

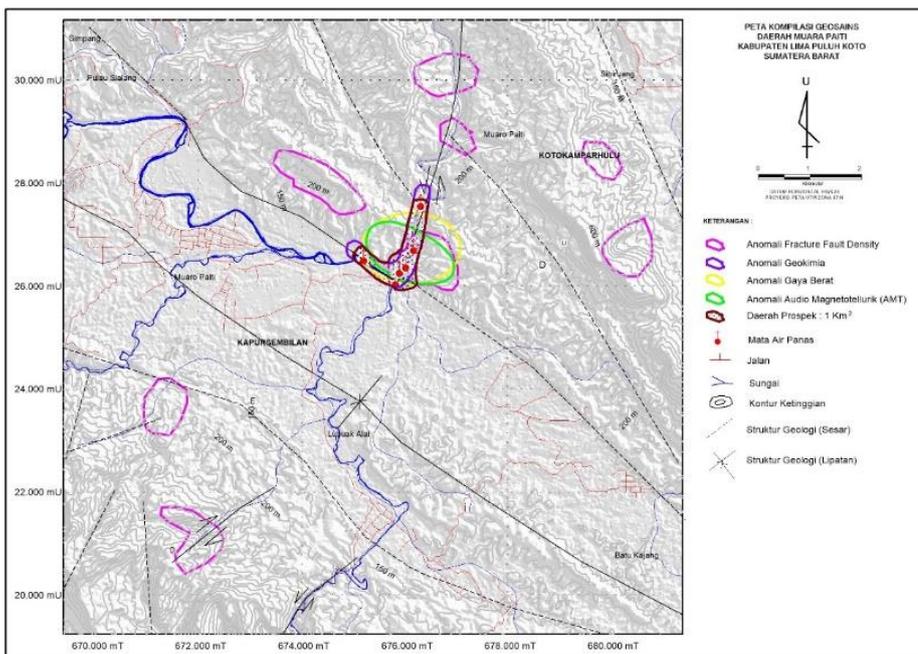
1979). Dalam hal ini, pembentukan sistem panas bumi daerah Muara Paiti berasosiasi dengan panas yang berasal dari peningkatan gradien panas yang sebanding dengan pertambahan kedalaman dan berkaitan dengan aktivitas sesar yang dapat berperan sebagai media sirkulasi air meteorik.

Berdasarkan integrasi data geologi, geokimia dan geofisika, menunjukkan bahwa daerah survei memiliki daerah prospek disekitar perpotongan antar sesar

dengan luas sekitar 1 km² (Gambar 10), sedangkan estimasi sumberdaya panas bumi daerah Muaro Paiti berdasarkan metode volumetrik, diperoleh sumberdaya panas bumi sebesar 2 MWe pada kelas sumberdaya hipotetik. Peluang adanya daerah prospek panas bumi di daerah Muaro Paiti dapat digunakan sebagai pemanfaatan langsung, diantaranya pengelolaan kawasan wisata dalam bentuk pemandian air hangat/air panas, pengeringan gambir dan akuakultur.



Gambar 9. Konseptual model daerah Muara Paiti



Gambar 10. Peta kompilasi geosains daerah Muara Paiti

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kondisi geologi daerah Muara Paiti yang berada di Cekungan Sumatera Tengah menunjukkan bahwa daerah survei memiliki keterkaitan dengan pembentukan sistem panas bumi pada cekungan sedimen yang disertai adanya pengaruh *thermal gradient* dan kontrol struktur. Selain itu, pembentukan sistem panas bumi di cekungan sedimen diduga berkaitan juga dengan sistem sirkulasi dalam (*deep circulation*) yang merupakan hasil dari sirkulasi dalam air meteorik di sepanjang zona sesar atau zona rekahan pada daerah yang memiliki *heat flow* yang tinggi.

Sebaran daerah yang menarik (*interest area*) diperkirakan berada disekitar kompleks mata air panas Muara

Paiti, tepatnya di sekitar perpotongan antar sesar dengan luas areal sekitar 1 km², dengan estimasi sumberdaya panas bumi sebesar 2 MWe pada kelas sumberdaya hipotetik.

Keberadaan mata air panas di daerah survei dapat memberikan peluang untuk digunakan sebagai pemanfaatan langsung.

Saran

Diperlukan penyelidikan lebih lanjut dengan metode *Time Domain Electro Magnetic* (TDEM) ataupun geolistrik. Sedangkan, untuk mengetahui keberlangsungan keluarnya mata air panas, terkait debit yang dapat dipakai untuk pemandian ataupun pemanfaatan lainnya dapat digunakan uji pemompaan (*pumping test*).

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2023, "Survei Rinci Geologi, Geokimia, Gaya Berat dan Audiomagnetotellurik di Daerah Panas Bumi Lima Puluh Kota, Sumatera Barat", Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- Anderson, D. N., & Lund, J. W., 1979, Direct utilization of geothermal energy: a layman's guide. Geothermal. Resources Council special report No. 8
- Clarke, Kartawa, Bagdja.M, 1982, "Peta Geologi Lembar Pekanbaru, Sumatera Barat", Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan Republik Indonesia.
- Eubank, R. T. & Makki, A. C., 1981. Structural geology of the Central Sumatra Back-arc Basin. Jakarta, IPA.
- Grysen, T., Gibson, D. & Nicholson, K., 2016. Geothermal (heat flow) map of the Sumatra, Munchie: 50th Annual GSA North-Central Section Meeting.

Giggenbach, W.F., 1988, "Geothermal Solute Equilibria Deviation of Na-K-Mg – Ca Geo-Indicators. *Geochemica Acta* 52. pp. 2749 – 2765".

Heidrick, T. L., & Aulia, K, 1993, "A Structural and Tectonic Model of the Coastal Plains Block, Central Sumatra Basin, Indonesia".

PEMUTAKHIRAN DATA DAN NERACA SUMBER DAYA PANAS BUMI TAHUN 2023**Winda Nirmala, Ratna Dewi, dan Tria Selvi Rustika**Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi**SARI**

Pemutakhiran data dan neraca sumber daya panas bumi dimaksudkan untuk menyediakan data sumber daya dan cadangan serta informasi panas bumi yang lebih baru dan lebih akurat. Data panas bumi yang termutakhirkan dan lebih akurat ini ditujukan sebagai informasi untuk para pemangku kepentingan dalam pengembangan panas bumi pada umumnya serta khususnya sebagai bahan dan masukan kepada pemerintah dalam menyusun kebijakan pengembangan energi panas bumi untuk pembangunan yang berkelanjutan.

Pemutakhiran data dan neraca panas bumi tahun 2023 mengacu pada SNI 6009-2017 tentang Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi Indonesia. Pemutakhiran data dan neraca ini menghasilkan penambahan dua lokasi panas bumi baru dan ada penghapusan data lokasi sehingga jumlah lokasi menjadi 362 lokasi. Hasil kegiatan pemutakhiran hingga Desember 2023 didapatkan data potensi energi panas bumi kelas sumber daya spekulatif sebesar 5.713,5 MWe, sumber daya hipotetik 3.467 MWe, cadangan mungkin 9.575 MWe, cadangan terduga sebesar 1.494,35 MWe, cadangan terbukti sebesar 3.341,9 MWe dan kapasitas terpasang 2.374,4 MWe.

Kata kunci: pemutakhiran, neraca, panas bumi, sumber daya, cadangan

PENDAHULUAN

Sektor energi memiliki peran yang sangat penting dalam pembangunan nasional, terutama dalam mendukung perekonomian nasional serta sebagai sumber penerimaan negara. Ketersediaan sumber daya energi mutlak diperlukan dalam seluruh kegiatan industri yang pada akhirnya akan meningkatkan penerimaan negara dan kesejahteraan masyarakat.

Seiring dengan menurunnya produksi minyak bumi Indonesia,

peningkatan kebutuhan energi dalam negeri membuat pemerintah Indonesia harus membuat kebijakan untuk mengembangkan energi alternatif sebagai pengganti minyak bumi. Oleh karena itu pemerintah menetapkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, dan telah menyusun sasaran Program Bauran Energi untuk tahun 2023-2050. Pada tahun 2021 kontribusi Energi baru dan terbarukan (EBT) baru mencapai 12%, sedangkan

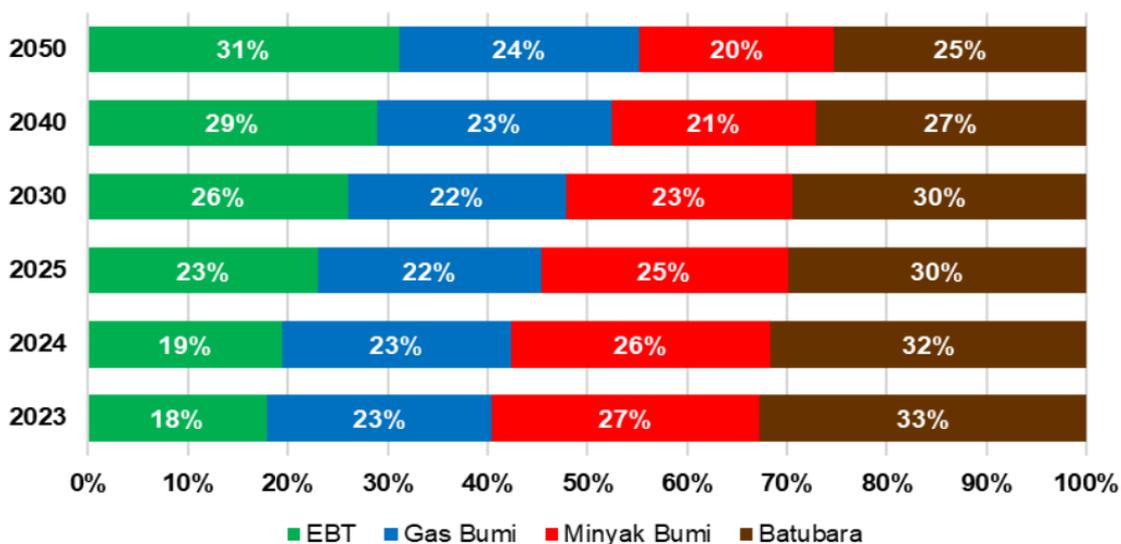
target II bauran energi tahun 2030 kontribusi EBT mencapai 26 % (Gambar 1).

Panas bumi merupakan salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi berlimpah di Indonesia, tetapi pemanfaatannya masih minim. Berdasarkan Undang-undang No. 21 Tahun 2014 tentang Panas Bumi dijelaskan peran pemerintah untuk menyediakan data melalui kegiatan eksplorasi untuk mempercepat investasi di bidang panas bumi. Sesuai Peraturan Menteri ESDM No. 15 Tahun 2021 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian ESDM, diuraikan bahwa Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) memiliki salah satu tugas dan fungsi untuk menyelenggarakan penelitian, penyelidikan dan pelayanan di bidang sumber daya panas bumi dan menyusun neraca sumber daya panas bumi.

Pemutakhiran data dan neraca sumber daya energi ini dilakukan untuk menyediakan data dan neraca sumber

daya dan cadangan serta informasi panas bumi yang lebih baru dan lebih akurat. Pemutakhiran data dan informasi panas bumi dalam bentuk tekstual dan spasial yang terdapat di dalam sistem basis data panas bumi serta pemutakhiran sumber daya panas bumi, baik dari hasil dari kegiatan penyelidikan internal PSDMBP, hasil evaluasi geosains untuk pengusulan WKP, hasil pengeboran eksplorasi oleh pemerintah (*government drilling*), serta pemutakhiran oleh Badan Usaha (BU).

Tujuan pemutakhiran data dan neraca sumber daya panas bumi adalah untuk tersedianya data dan neraca sumber daya dan cadangan energi panas bumi yang termutakhirkan, yang dilengkapi dengan peta sebaran potensi panas bumi dan tabulasi data neraca sumber daya panas bumi yang diharapkan dapat dijadikan sebagai masukan kepada pemerintah dalam menyusun kebijakan pengembangan energi panas bumi untuk pembangunan yang berkelanjutan.



Gambar 1. Target Bauran Energi Primer Tahun 2023-2050

METODE

Metode yang dilakukan dalam kegiatan pemutakhiran data neraca panas bumi ini dilakukan melalui proses pengisian formulir basis data panas bumi sebanyak 20 formulir basis serta pemutakhiran perhitungan potensi dari hasil penyelidikan PSDMBP tahun 2023, hasil evaluasi geosains untuk pengusulan WKP, hasil pengeboran eksplorasi oleh pemerintah (*government drilling*), serta pemutakhiran oleh Badan Usaha (BU).

Pekerjaan yang dilakukan meliputi: inventarisasi data, Pengolahan Data, Evaluasi data, integrasi data, verifikasi data dan penyusunan peta dan laporan. Secara rinci sebagai berikut (Gambar 2):

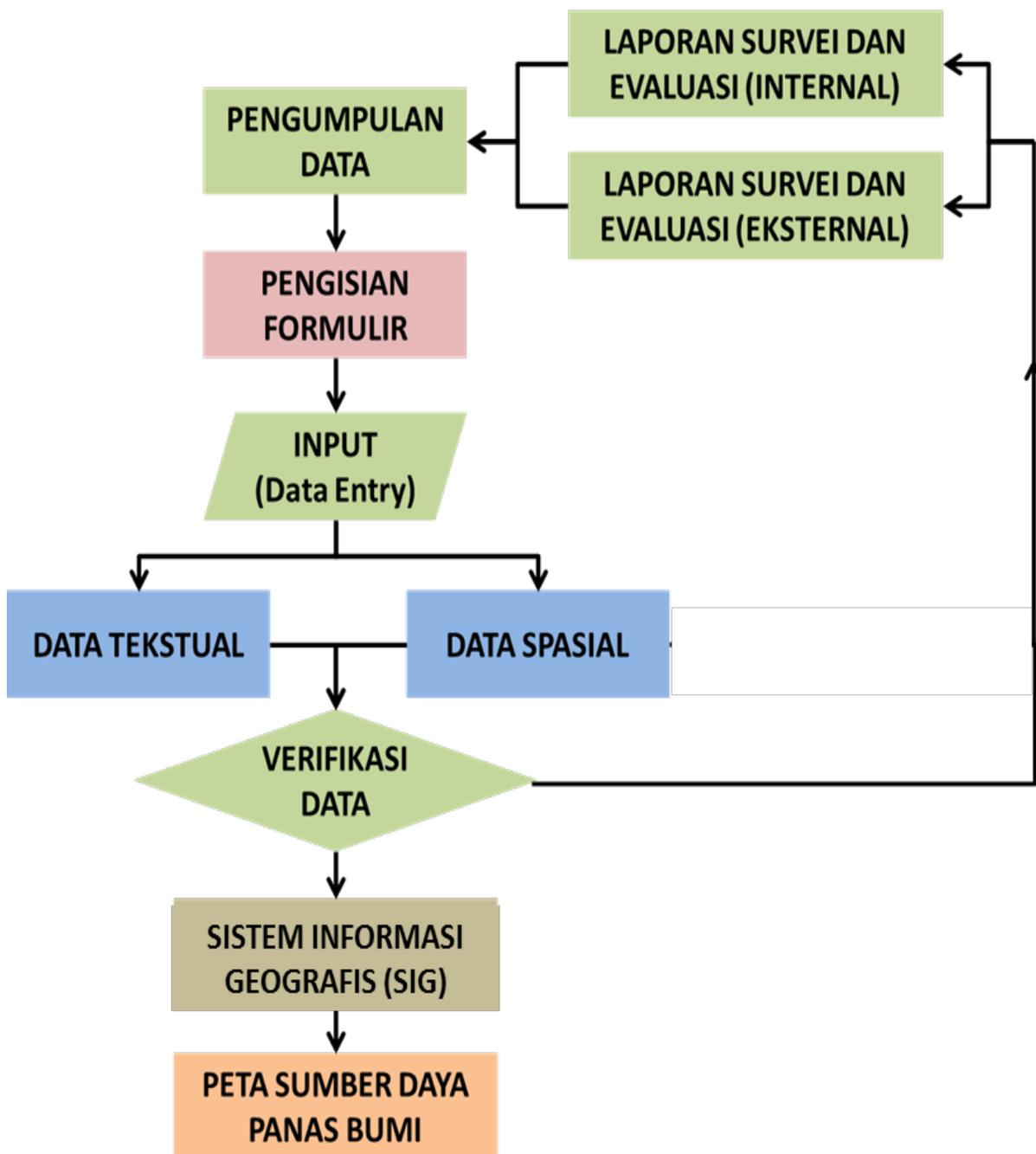
- a. Inventarisasi data mencakup: pengumpulan data dari laporan hasil kegiatan survei/eksplorasi Pemerintah maupun dari perusahaan panas bumi, terutama hasil penugasan survei pendahuluan dan pengawasan perusahaan energi panas bumi.
- b. Pengolahan data mencakup: analisis peta dasar bagi penyediaan informasi sumber daya panas bumi seluruh lokasi potensi panas bumi Indonesia beserta informasi data digital untuk setiap lokasi. Kemudian dilakukan pengisian formulir basis data, *editing* fitur, penentuan batas poligon dan titik, dan pembuatan *layout* peta digital. Di samping pengolahan peta, juga dilakukan pembuatan ringkasan geosain pada lokasi-lokasi survei/eksplorasi baru.
- c. Evaluasi data: pengolahan data kemudian dijadikan dasar untuk melakukan evaluasi, dimulai dari titik sebaran, keterdapatannya wilayah izin Panas Bumi dan izin pertambangan lainnya, hingga besaran sumber daya atau cadangannya.
- d. Integrasi data merupakan pekerjaan spasial dalam Sistem Informasi Geografis (SIG), berisi peta-peta digital tematik panas bumi, yang informasinya mencakup keterdapatannya, sumber daya dan cadangan sumber daya energi panas bumi
- e. Verifikasi data ini dilakukan agar pemutakhiran data terverifikasi secara baik.
- f. Penyusunan peta dan laporan

NERACA SUMBER DAYA DAN CADANGAN PANAS BUMI

Berdasarkan hasil pemutakhiran sumber daya panas bumi hingga Desember 2023 yang berasal dari evaluasi yang dilakukan oleh PSDMBP dan pembahasan bersama dengan Badan Usaha terkait data sumber daya panas bumi, menunjukkan adanya penambahan dua daerah panas bumi dan penghapusan satu lokasi panas bumi, sehingga jumlah total lokasi panas bumi Indonesia sebanyak 362 lokasi dengan total sumber daya panas bumi sebesar 23.591,75 MWe

dan total cadangan sebesar 14.411,25 Mwe . Dalam lima (5) tahun terakhir lokasi panas bumi di Indonesia secara umum mengalami penambahan jumlah lokasi. Begitu juga energi listrik yang telah berhasil dibangkitkan (Tabel 1). Akan tetapi total sumber daya panas bumi mengalami

penurunan nilai seperti yang ditunjukkan dalam grafik pada Tabel 2. Penurunan nilai sumber daya panas bumi disebabkan oleh peningkatan kualitas data geosains sehingga tingkat kepercayaan terhadap data meningkat.



Gambar 2. Diagram alir pekerjaan pemutakhiran data dan neraca sumber daya panas bumi

Pemutakhiran data sumber daya dan cadangan panas bumi tahun 2023 ini bersumber dari (Tabel 3):

- a. Hasil survei panas bumi yang dilakukan oleh PSDMBP. Survei pendahuluan daerah panas bumi Sangihe, survei terpadu daerah panas bumi Muaropaiti dan survei MT daerah panas bumi Adum.
- b. Hasil survei panas bumi penambahan data / akuisisi data untuk daerah panas bumi Bora-Pulu dan Sipoholon.
- c. Hasil evaluasi geosains untuk pengusulan WKP pada daerah panas bumi Way Umpu dan Gou Inelika. Evaluasi tersebut menghasilkan perubahan nilai sumber daya.
- d. Perubahan nilai sumber daya spekulatif untuk daerah panas bumi Rana Kulon dan perubahan nilai sumber daya hipotetis untuk daerah Ranang-Kasimbar dan Parigi Balesu yang merupakan hasil dari kroscek laporan.
- e. Penghapusan lokasi Helatoba berdasarkan hasil survei daerah panas bumi Sipoholon lokasi tersebut tidak ditemukan di lapangan.
- f. Penambahan lokasi baru daerah panas bumi Gunung Tiga berdasarkan laporan PT Pertamina Geothermal Energy (PGE) akibat adanya dugaan perbedaan sistem dengan prospek Waypanas.
- g. Perubahan nilai cadangan daerah panas bumi Dieng akibat penyesuaian paramater sumur *core hole*, pada daerah panas bumi Patuha akibat perubahan metode perhitungan cadangan.
- h. Hasil pemutakhiran terhadap nilai cadangan oleh PT Geo Dipa Energi (GDE) untuk daerah panas bumi Dieng dan Patuha.
- i. Hasil pemutakhiran terhadap nilai cadangan oleh PT PGE untuk daerah panas bumi Kamojang, Masigit, Sibayak, Lahendong, Tompasso, Lumut Balai, Margabayur, Karaha Bodas, Hululais, Bukit Daun, Tambang Sawah, Sungai Penuh, dan daerah panas bumi Kotamubago.
- j. Hasil pemutakhiran terhadap nilai cadangan dan kapasitas terpasang oleh PT Sorik Marapi Geothermal Power (SMGP) untuk daerah panas bumi Sorik Merapi.
- k. Hasil pemutakhiran terhadap nilai cadangan oleh PT Star Energy Geothermal Salak (SEGS) untuk daerah panas bumi Kawah Ratu.
- l. Hasil pemutakhiran terhadap nilai cadangan oleh PT Sumbawa Timur Mining (STM) untuk daerah panas bumi Huu-Daha.

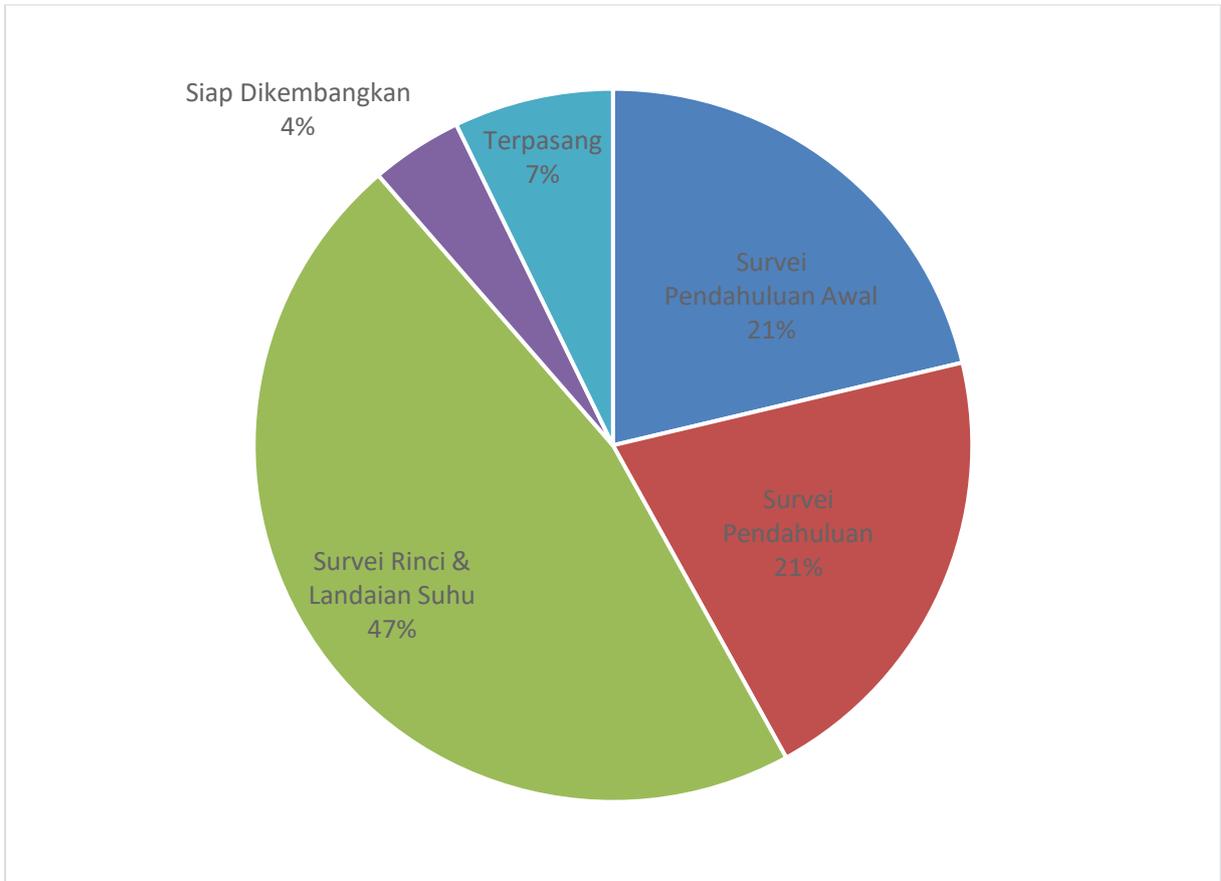
Pelaksanaan survei panas bumi di beberapa daerah panas bumi sehingga merubah prosentase tingkat penyelidikan Gambar 3.

Tabel 1. Status Potensi Panas Bumi Tahun 2023

No	Pulau	Jumlah Lokasi	Sumber Daya (Mwe)					Terpasang
			Spekulatif	Hipotetis	Cadangan			
					Mungkin	Terduga	Terbukti	
1	Sumatera	104	2.160,50	1.561,00	3.780,00	760,00	1.361,40	962,55
2	Jawa	77	1.119,00	1.303,00	3.489,00	257,00	1.765,00	1.267,80
3	Bali	6	70,00	21,00	104,00	110,00	30,00	0,00
4	Nusa Tenggara	34	219,00	134,00	668,00	199,35	33,50	24,08
5	Kalimantan	14	151,00	18,00	6,00	0,00	0,00	0,00
6	Sulawesi	91	1.359,00	350,00	1.032,00	162,00	150,00	120,00
7	Maluku	33	560,00	80,00	496,00	6,00	2,00	0,00
8	Papua	3	75,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total		362	5.713,50	3.467,00	9.575,00	1.494,35	3.341,90	2.374,43
					14.411,25			
					23.591,75			

Tabel 2. Perkembangan Status Potensi Energi Panas Bumi Tahun 2019 s.d. 2023

Tahun	Jumlah Lokasi	Spekulatif	Hipotetis	Mungkin	Terduga	Terbukti	Terpasang
2019	351	5.952,00	3.387,00	9.696,00	1.875,70	3.054,80	2.130,60
2020	357	5.981,00	3.363,00	9.547,00	1.770,00	3.104,50	2.130,70
2021	356	5.849,00	3.376,00	9.251,00	1.770,00	3.110,90	2.276,90
2022	361	5.774,50	3.444,00	8.968,00	1.664,00	3.209,90	2.355,43
2023	362	5.713,50	3.467,00	9.575,00	1.494,35	3.341,90	2.374,43



Gambar 3 Tahapan Penyelidikan Potensi Panas Bumi Status 2023

Tabel 3. Perubahan Sumber Daya Panas Bumi 2023

No	Nama Lapangan	Kabupaten	Sumber Daya					Kapasitas Terpasang	Keterangan
			Spekulatif	Hipotetis	Cadangan				
					Mungkin	Terduga	Terbukti		
366	Angges	Kepulauan Sangihe	7	-	-	-	-	-	Lokasi baru dan Hasil Survei PSDMBP
362	Muaropaiti	Lima Puluh Kota	8,5	2	-	-	-	-	Hasil Survei PSDMBP
181	Adum	Lembata	-	-	20	-	-	-	Hasil Survei PSDMBP
44	Pariangan	Tanah Datar	-	44	27	-	-	-	Kroscek laporan
162	Marongge	Sumbawa	6	-	-	-	-	-	Kroscek laporan
305	Rana Kulan	Manggarai Timur	5	-	-	-	-	-	Kroscek laporan
281	Ranang - Kasimbar	Parigi Moutong	-	10	-	-	-	-	Kroscek laporan
330	Parigi - Balesu	Parigi Moutong	-	6	-	-	-	-	Kroscek laporan
215	Sangalla	Tanatoraja	25	12	-	-	-	-	Kroscek laporan

No	Nama Lapangan	Kabupaten	Sumber Daya					Kapasitas Terpasang	Keterangan
			Spekulatif	Hipotetis	Cadangan				
					Mungkin	Terduga	Terbukti		
225	Mangolo	Kolaka	-	10	-	-	-	-	Kroscek laporan
25	Helatoba	Tapanuli Utara	-	-	-	-	-	-	Penghapusan Nomor Lokasi
367	Gunung Tiga	Tanggamus	-	-	85	-	-	-	Penambahan Lokasi Baru
136	Dieng	Banjarnegara	-	-	121	-	275	72,8	Pemutakhiran Cadangan oleh PT GDE
104	Gunung Patuha	Bandung	-	-	65	-	110	55	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
112	Kamojang	Bandung	-	-	125	15	240	235	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
111	Gunung Masigit – Guntur	Garut	-	-	70	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
18	Beras Tepu	Karo	-	-	-	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
19	Lau Debukdebuk – Sibayak	Karo	-	-	15	10	30	12	
187	Lahendong	Kota Tomohon	-	-	75	30	95	80	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
188	Tompaso	Minahasa	-	-	152	132	55	40	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
68	Bukit Lumut Balai	Ogan Komering Ulu	-	-	135	120	150	55	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
70	Marga Bayur	Ogan Komering Ulu Selatan	-	-	110	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
117	Gunung Telagabodas-Karaha	Garut	-	-	-	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
122	Gunung Karaha	Tasikmalaya	-	-	45	25	30	30	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
60	Bukit Gedung - Hulu Lais	Lebong	-	-	105	90	170	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
59	Tambang Sawah	Lebong	-	-	60	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE

No	Nama Lapangan	Kabupaten	Sumber Daya					Kapasitas Terpasang	Keterangan
			Spekulatif	Hipotetis	Cadangan				
					Mungkin	Terduga	Terbukti		
61	Bukit Daun - Lebong Simpang	Lebong	-	-	38	55	20	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
54	Semurup - Sungai Penuh	Kerinci	-	-	65	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
55	Lempur - Kerinci	Kerinci	-	-	18	30	10	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
190	Kotamobagu	Bolaang Mongondow	-	-	91	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT PGE
31	Sorik Merapi - Sibangor	Mandailing Natal	-	-	50	33	157	162,15	Pemutakhiran Cadangan dan kapasitas terpasang oleh PT SMGP
32	Sampuraga	Mandailing Natal	-	-	28	-	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT SMGP
172	Sokoria	Ende	-	-	8	10	21	11,58	Pemutakhiran Cadangan oleh PT SGI
90	Kawah Ratu - Salak	Bogor	-	-	38	5	-	377	Pemutakhiran Cadangan oleh PT SEGS
91	Kiaraberes - Salak	Sukabumi	-	-	162	15	497		
92	Awibengkok	Bogor	-	-	-	-	-		
163	Huu - Daha	Dompu	-	-	-	61,35	-	-	Pemutakhiran Cadangan oleh PT STM
201	Bora	Sigi	-	-	39	-	-	-	Hasil Survei dan Inegrasi Data PSDMBP
202	Pulu	Sigi	-	-	13	-	-	-	Hasil Survei dan Inegrasi Data PSDMBP
26	Sipoholon	Tapanuli Utara	-	-	35	-	-	-	Hasil Survei dan Inegrasi Data PSDMBP
72	Wai Umpu	Way Kanan	-	28	26	-	-	-	Hasil Evaluasi Geosains
167	Gou Inelika	Ngada	-	-	36	-	-	-	Hasil Evaluasi Geosains

Berdasarkan hasil evaluasi geosains usulan WKP pada tahun 2023 oleh PSDMBP, terdapat dua daerah panas bumi yang mengalami perubahan nilai sumber daya pada kelas cadangan mungkin. Kedua daerah tersebut adalah daerah panas bumi Gou Inelika dengan nilai sumber daya pada kelas cadangan mungkin yang terkoreksi menjadi 36 Mwe dari sebelumnya 30 Mwe dan daerah panas bumi Way Umpu yang terkoreksi menjadi sumber daya hipotetis 22 Mwe dan cadangan mungkin 32 Mwe dari sebelumnya sumber daya hipotetis 40 Mwe dan cadangan mungkin 14 Mwe.

Penelusuran dan penyesuaian dengan laporan terdapat beberapa daerah panas bumi yang mengalami perubahan seperti daerah panas bumi Pariangan, daerah panas bumi Marongge, daerah panas Rana Kulon, daerah panas bumi Ranang-Kasimbar, daerah panas bumi Parigi-Balesu, daerah panas bumi Sangalla, daerah panas bumi Mangolo.

Hasil kegiatan penyelidikan tahun anggaran 2023 oleh PSDMBP terdapat perubahan sumber daya. Perubahan-perubahan yang terjadi antara lain adalah penghapusan daerah panas bumi Helatoba berdasarkan hasil penyelidikan akuisisi data daerah panas bumi Sipoholon. Penambahan lokasi baru yaitu daerah panas bumi Sangihe berdasarkan penyelidikan pendahuluan daerah panas bumi Angges dengan penambahan sumber daya spekulatif 7 Mwe. Perubahan nilai

sumber daya Muaropaiti berdasarkan hasil penyelidikan terpadu geologi, geokimia dan geofisika daerah panas bumi Muaropaiti menjadi 8,5 Mwe sumber daya spekulatif dan 2 Mwe sumber daya hipotetis. Perubahan nilai sumber daya cadangan mungkin daerah panas bumi Adum menjadi 20 Mwe. Berdasarkan hasil survei akuisisi data dan integrasi data geosains terjadi perubahan data cadangan pada daerah Bora dan Pulu mejadi 39 Mwe dan 13 Mwe pada kelas cadangan mungkin, sedangkan untuk daerah panas bumi Sipoholon tetap pada 35 Mwe nilai sumber daya cadangan mungkin.

Laporan pemutakhiran cadangan oleh PT PGE (PT. Pertamina Geothermal Energi) terdapat perubahan sumber daya cadangan dan penambahan satu daerah baru yaitu Gunung Tiga dengan nilai sumber daya cadangan mungkin sebesar 85 Mwe. Perubahan sumber daya cadangan terjadi pada daerah panas bumi Kamojang, daerah panas bumi Gunung Masigit-Guntur, daerah panas bumi Beras Tepu, daerah panas bumi Lahendong, daerah panas bumi Tompaso, daerah panas bumi Bukit Lumut Balai, daerah panas bumi Gunung Telagabodas-Karaha, daerah panas bumi Bukit Gedung- Hulu Lais, daerah panas bumi Tambang Sawah, daerah panas Bukit Daun-Lebong Simpang, daerah panas bumi Semurup-Sungai Penuh, daerah panas bumi Lempur-Kerinci, daerah panas bumi Kotamobagu. Besarnya total perubahan

dari daerah-daerah tersebut adalah perubahan pada sumber daya cadangan mungkin mengalami kenaikan 658 Mwe, perubahan pada sumber daya cadangan terduga mengalami penurunan 74 Mwe dan perubahan pada sumber daya cadangan terbukti mengalami kenaikan 30 Mwe.

Laporan pemutakhiran cadangan oleh PT. GDE (PT. Geo Dipa Energi) terdapat perubahan sumber daya cadangan mungkin menjadi 121 Mwe, sumber daya cadangan terbukti dari 240 Mwe menjadi 275 Mwe, dan kapasitas terpasang dari 60 Mwe menjadi 72,8 Mwe (1x60 Mwe dan 1x12,8 Mwe skala kecil). Perubahan nilai juga terjadi pada nilai sumber daya cadangan mungkin dan terbukti untuk daerah panas bumi Patuha yang semula bernilai 0 Mwe menjadi 65 Mwe pada cadangan mungkin dan 240 Mwe menjadi 110 Mwe.

Laporan pemutakhiran cadangan oleh PT. SMGP (PT. Sorik Merapi Geothermal Power) terjadi perubahan data sumber daya cadangan pada daerah panas bumi Sorik Merapi dan Sampuraga. Adapun detail perubahannya adalah pada daerah panas bumi Sorik Merapi mengalami penurunan sumber daya cadangan terduga dari 55 Mwe menjadi 33 Mwe dan kenaikan sumber daya cadangan terbukti dari 135 Mwe menjadi 157 Mwe. Pada daerah panas bumi Sampuraga mengalami perubahan pada sumber daya cadangan mungkin menjadi 28 Mwe.

Laporan pemutakhiran cadangan yang disampaikan oleh PT. SEGS (PT. Star Energy Geothermal Salak) mengalami perubahan sumber daya cadangan mungkin pada daerah panas bumi Kawah Ratu dari 27 Mwe menjadi 38 Mwe.

Laporan pemutakhiran cadangan yang disampaikan oleh PT. STM (PT. Sumbawa Timur Mining) terjadi perubahan kelas sumber daya dari sumber daya cadangan mungkin dari menjadi sumber daya cadangan terduga dengan nilai 69 Mwe menjadi 61,35 Mwe pada daerah panas bumi Huu Daha.

PENUTUP

Jumlah sumber daya panas bumi Indonesia status Desember tahun 2023 sebesar 23.591,75 MWe dengan cadangan panas bumi sebesar 14.411,25 MWe. Sedangkan, untuk kapasitas terpasang hingga Desember 2023 mencapai 2.374,43 MWe.

Perbandingan nilai sumber daya dan cadangan tahun 2023 dibandingkan dengan tahun 2022 mengalami perubahan, dimana sumber daya spekulatif mengalami penurunan nilai sebesar 61 MWe, sedangkan sumber daya hipotetis mengalami peningkatan nilai sebesar 23 MWe. Sementara itu, cadangan mungkin mengalami kenaikan nilai sebesar 607 MWe. Sedangkan nilai cadangan terduga mengalami penurunan sebesar 169,65 MWe. Nilai cadangan terbukti mengalami peningkatan sebesar 132 MWe dan untuk

kapasitas terpasang tahun 2023 mengalami kenaikan 19 MWe.

Terdapat penambahan dua (2) lokasi panas bumi, dan penghapusan satu (1) lokasi panas bumi sehingga status Desember 2023 terdapat 362 lokasi panas bumi.

Perubahan nilai sumber daya dan cadangan panas bumi tahun 2023 berasal dari survei yang dilakukan oleh PSDMBP, hasil evaluasi geosains untuk pengusulan WKP yang dilakukan oleh PSDMBP, serta pemutakhiran nilai cadangan oleh badan usaha.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan Terima kasih kepada Kepala PSDMBP yang telah memberikan pengarahan dalam penyusunan neraca ini. Selain itu terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan laporan Pemutakhiran data dan neraca sumber daya panas bumi dalam memberikan masukan dalam penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 13-6482-2000 Angka Parameter Dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 6009-2017 Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Energi Panas Bumi Indonesia.
- Dewan Energi Nasional. (2022). *Energi Outlook 2022*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2021 Tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*.
- Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi. (2023). *Pemutakhiran Data dan Neraca Sumber Daya Panas Bumi*. Bandung.
- Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional*.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2014 Tentang Panas Bumi*. Jakarta: Sekretariat Negara.

SURVEI RINCI MT DAN TDEM DAERAH PANAS BUMI BORA PULU KABUPATEN SIGI, PROVINSI SULAWESI TENGAH

Wiwid Joni, Asep Sugianto, dan Winarno Awaludin

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Bora Pulu berada pada lingkungan non-vulkanik dan dikontrol oleh sesar utama Palu-Koro yang membentuk depresi di tengah daerah penyelidikan. Pendekatan sistem panas bumi Bora Pulu di bawah permukaan dilakukan menggunakan metoda geofisika, salah-satunya metode Magnetotellurik (MT). Berdasarkan hasil pemodelan 3-D data MT menunjukkan adanya lapisan konduktif <25 Ohm-m di sekitar manifestasi Mapane dan meluas ke arah barat laut, sedangkan di daerah Bora menunjukkan adanya lapisan konduktif <15 Ohm-m berupa spot memanjang. Keberadaan lapisan konduktif tersebut diduga berasosiasi dengan lapisan penudung dari sistem panas bumi Pakuli dan Bora. Keberadaan top reservoir dari sistem panas bumi di daerah Bora dan Pakuli diduga berada pada elevasi -500 m, atau berada pada kedalaman 600 m.

Hasil kompilasi data geosains (geologi, geokimia, dan geofisika) daerah panas Bora Pulu menghasilkan luasan prospek di daerah Pakuli seluas 3 km² untuk P50 (most likely), dan di daerah Bora seluas 10,5 km² untuk P50 (most likely). Dengan melakukan perhitungan Monte Carlo dihasilkan potensi cadangan mungkin di daerah Pakuli sebesar 13 MWe dan di daerah Bora sebesar 39 MWe. Dengan demikian, total potensi panas bumi di daerah panas bumi Bora Pulu menghasilkan potensi sebesar 52 MWe.

Kata kunci: panas bumi, Bora, Pulu, Pakuli, Mapane, lapisan penudung, reservoir, prospek

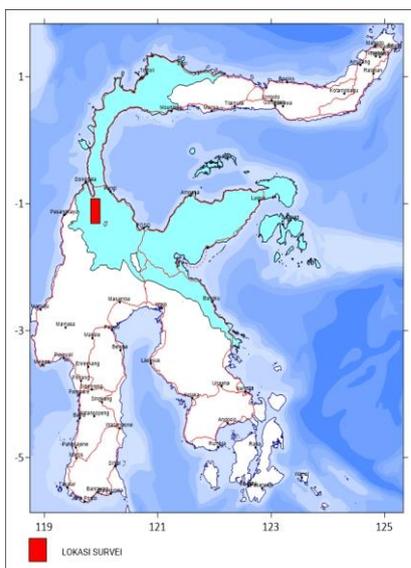
PENDAHULUAN

Pengukuran MT di daerah Bora telah dilakukan pada tahun anggaran 2010. Hasil evaluasi AHP (*analytical hierarchy process*), daerah panas bumi Bora Pulu termasuk salah satu dari 20 wilayah dengan potensi yang cukup menarik untuk dilakukan penambahan data geosain. Dengan alasan cakupan area yang sangat

luas, sehingga pengukuran MT dan TDEM pada tahun anggaran 2023 dilakukan di daerah Pakuli (Mapane). Dengan demikian data MT daerah Bora sebagai data sekunder atau dengan kata lain diproses ulang untuk memberlakukan data MT yang sama daerah Bora dan Pakuli dalam pengolahan data MT tersebut.

Secara administratif, daerah Pakuli berada di Kecamatan Gumbasa, sedangkan daerah Bora berada di Kecamatan Sigi Kota. Kedua daerah tersebut termasuk ke dalam Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah dan berada pada zona UTM 50 S (Gambar 1). Daerah penyelidikan dapat dicapai menggunakan kendaraan roda empat dari Kota Palu sekitar 36 km.

Maksud dari survei MT dan TDEM adalah untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan melalui anomali tahanan jenis yang berkorelasi dengan sistem panas bumi di daerah panas bumi Bora Pulu. Tujuan survei MT dan TDEM adalah untuk memperoleh data keprospekan (letak, delineasi dan besarnya potensi) daerah panas bumi dari tinjauan data geofisika. Data keprospekan ini kemudian akan dijadikan sebagai data pendukung bagi evaluasi keprospekan daerah panas bumi Bora Pulu.



Gambar 1. Peta indeks lokasi daerah survei

METODOLOGI

Pengukuran magnetotellurik (MT) sensitif terhadap struktur tahanan jenis bumi dengan penetrasi kedalaman melebihi 100 km (Cagniard, 1953; Swift, 1967; Word et al., 1971; Vozoff, 1972; Larsen, 1981; Wannamaker, 1983). Metode MT mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (B) alami secara ortogonal di permukaan bumi (Simpson, F., dan Bahr, K., 2005) untuk menghasilkan impedansi yang menggambarkan penetrasi medan elektromagnetik ke dalam bumi (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953).

Data *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) digunakan untuk mengoreksi statistik data MT (Pellerin, 1991). Metode TDEM (EM aktif) hanya mengukur peluruhan medan magnet sekunder terhadap waktu dalam bentuk tegangan transien (Eypórssón, E., 2015). Dengan hanya melibatkan pengukuran medan magnet sekunder. Metode TDEM relatif tidak terpengaruh oleh topografi permukaan dan faktor topografi sehingga dapat berfungsi sebagai koreksi statistik data MT (Stenberg, B.K., dkk, 1988).

Pengolahan data MT di daerah Bora Pulu menggunakan pemodelan 1-D dan 3-D. Pendekatan 1-D dapat diandalkan daripada pendekatan 2-D dan 3-D di atas reservoir, namun tidak dapat dalam penentuan batas tersebut (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010). Keterbatasan dari pemodelan 1-D tersebut dapat diatasi

dengan melakukan pemodelan 3-D. Dengan melakukan pemodelan 3-D, kita dapat menentukan batas bawah zona lapisan penudung karena kedalaman efektif pemodelan 3-D tidak dibatasi oleh asumsi geometris sebagaimana yang terjadi pada pemodelan 1-D (Miensopust, M.P, dkk., 2013; Tietze, K., dan Ritter, O., 2013). Hasil pemodelan 1-D dan 3-D di daerah panas bumi Bora Pulu diharapkan dapat membangun model konseptual sistem panas bumi secara terintegrasi.

GEOLOGI

Daerah panas bumi Bora Pulu berada pada lingkungan non-vulkanik, dan dikontrol oleh sesar utama Palu-Koro yang membentuk depresi (*pull-apart basin*) di tengah daerah penyelidikan. Perpotongan sesar-sesar minor dengan sesar Palu Koro menghasilkan zona permeabilitas pada sistem panas bumi Bora Pulu. Kehadiran mata air panas, tanah panas, dan tanah beruap di lokasi manifestasi Bora dan Mapane sebagai indikasi bahwa reservoir panas bumi Bora dan Mapane berada di bawah atau tidak jauh dari manifestasi panas bumi tersebut. Sistem panas bumi Bora Pulu kemungkinan setempat-setempat dengan kontrol sesar yang kuat dalam penyebaran atau aliran fluida panasnya.

Litologi yang menyusun daerah panas bumi Bora Pulu tersusun atas Satuan Sekis (TRJs), Satuan Granit Genesan (TRJg), Satuan Filit (Kf) berumur

Pra-Tersier, Satuan Granit Olojuju (Tmgo), Satuan Granit Salubi (Tmgs) berumur Tersier, Endapan Kolovium (Qk), dan Endapan Aluvium (Qa). Struktur geologi utama daerah survei adalah sesar Palu-Koro yang merupakan sesar mendatar mengiri dengan tegasan utama relatif berarah utara – selatan. Sesar-sesar minor berupa sesar mendatar berarah timurlaut - baratdaya, barat - timur, dan baratlaut - tenggara merupakan sesar-sesar berumur tua yang mengalami re-aktivasi akibat *trigger* dari sesar Palu – Koro yang masih aktif hingga sekarang.

DATA PENGUKURAN

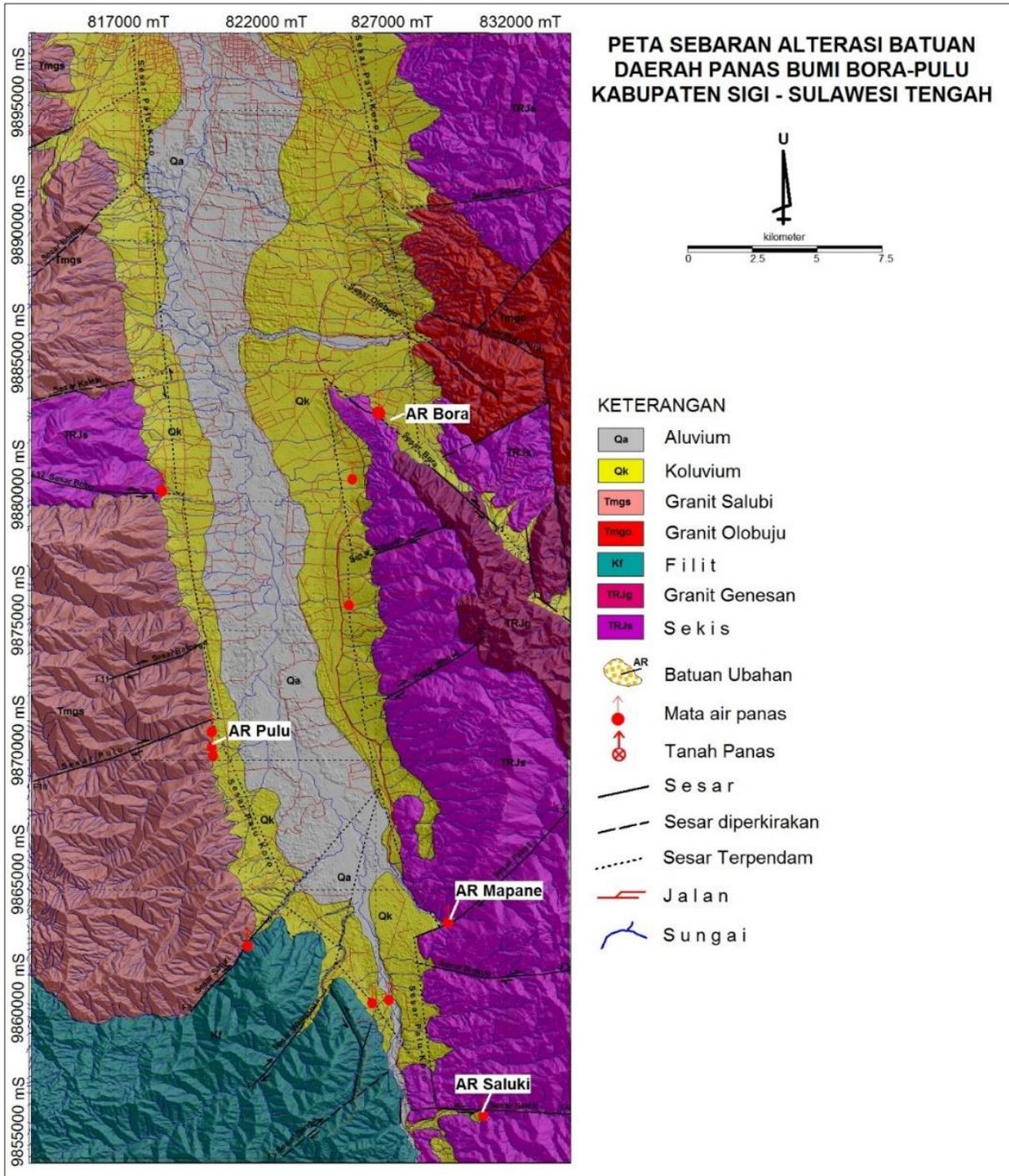
Pengukuran titik ukur MT sebanyak 34 titik ukur. Sebaran titik-titik ukur MT memiliki jarak antar titik ukur 500 – 1500 meter. Daerah Bora merupakan data sekunder MT yang berjumlah 39 titik ukur MT. Kedua data daerah Pakuli dan Bora akan dilakukan pemodelan 1-D dan 3-D secara terpisah dengan alasan kedua daerah tersebut cukup jauh (Gambar 3).

HASIL DAN DISKUSI DAERAH PAKULI

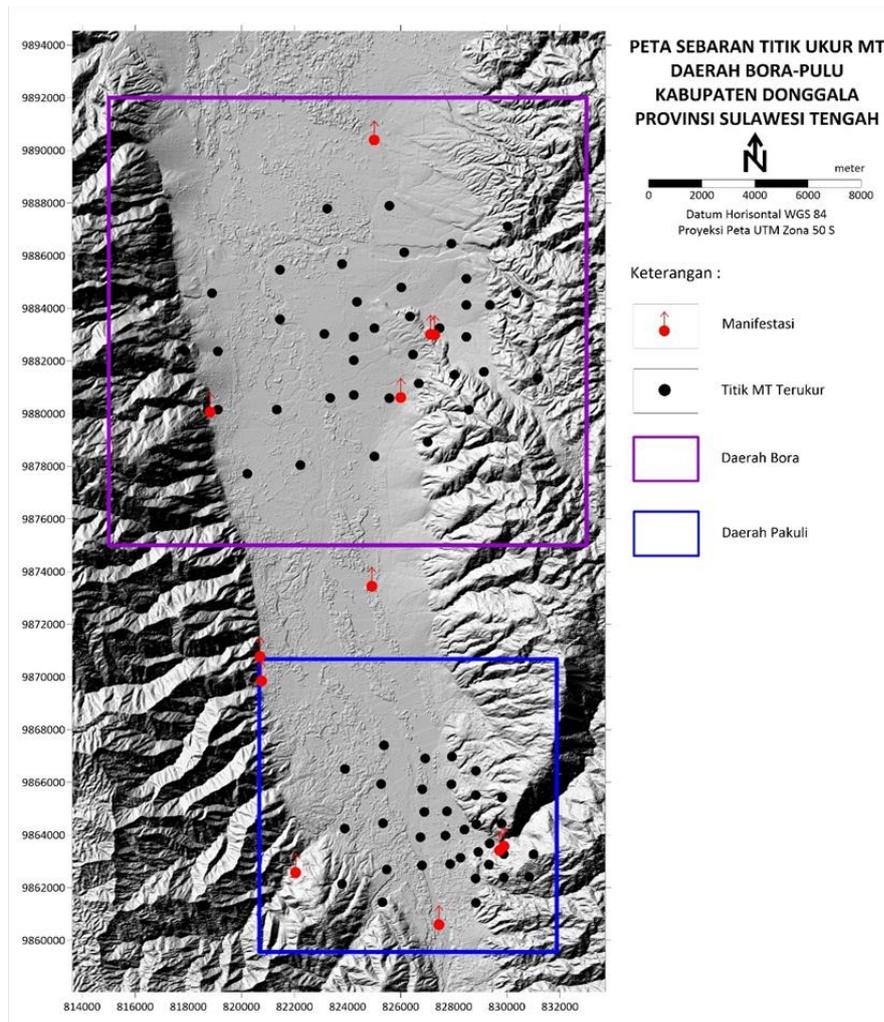
Berdasarkan hasil pemodelan 3-D daerah Pakuli (Gambar 4), degradasi nilai tahanan jenis di sekitar mata air panas Mapane dan meluas ke arah baratlaut diduga berhubungan dengan sistem panas bumi di daerah Pakuli. Dari permukaan hingga elevasi -500 m, nilai tahanan jenis rendah <25 Ohm-m berada di sekitar mata air panas Mapane meluas ke arah baratlaut

daerah penyelidikan dengan pola melingkar. Tahanan jenis tinggi di tengah hingga meluas ke arah baratdaya dan tahanan jenis tinggi di bagian tenggara diduga sebagai respon batuan malihan yang sangat masif berumur Trias – Kapur.

Pada elevasi -600 m, tahanan jenis rendah tersebut relatif menjadi tahanan jenis sedang, dan pada elevasi -700 m, tahanan jenis tersebut menjadi tahanan jenis sedang.



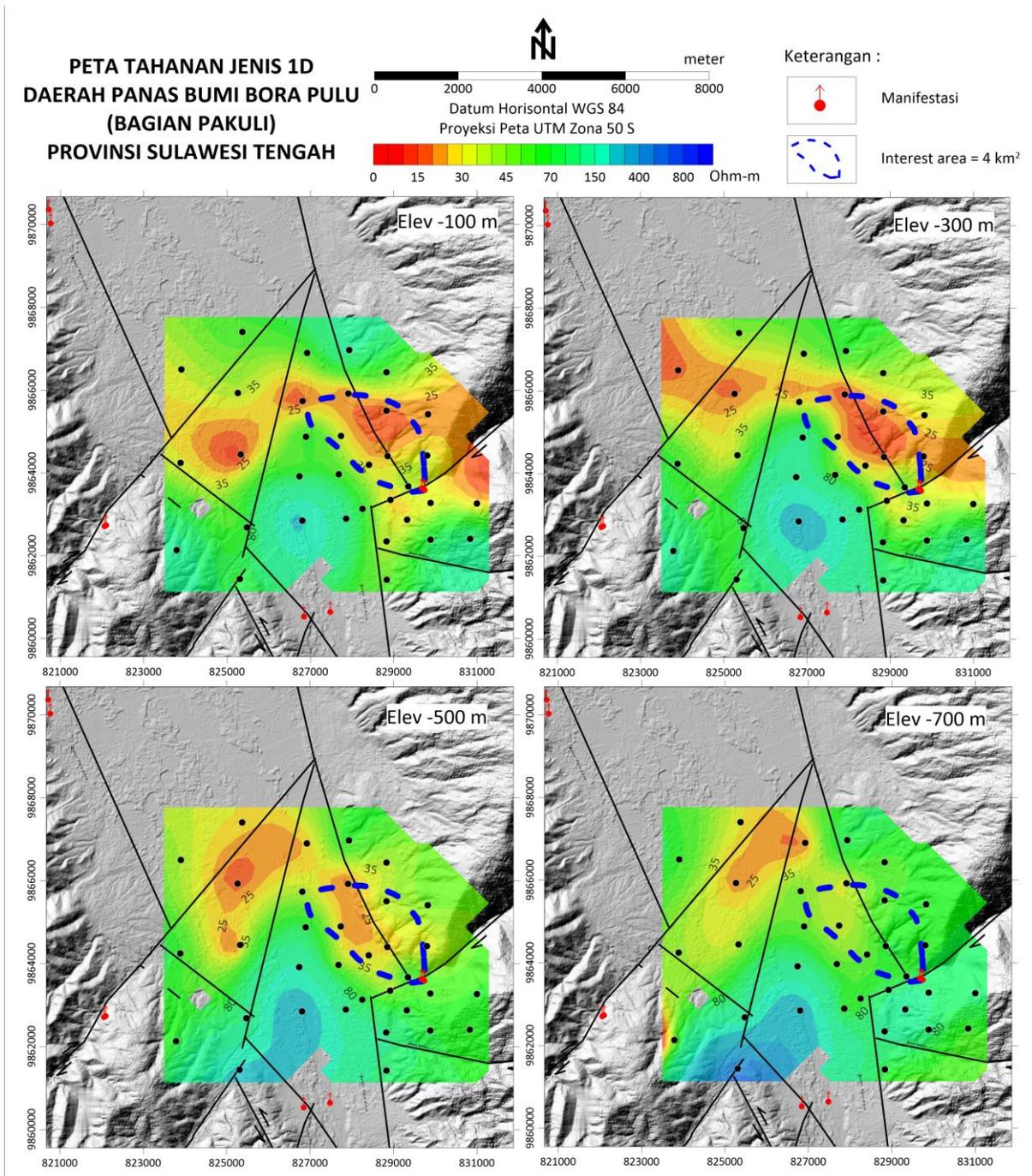
Gambar 2. Peta geologi rinci daerah panas bumi Bora Pulu



Gambar 3. Peta sebaran titik ukur MT daerah Bora Pulu

Penampang tahanan jenis lintasan 4 (Gambar 5) berarah baratdaya-timurlaut. Hasil pemodelan lintasan tersebut menghasilkan anomali tahanan jenis rendah <25 Ohm-m yang menarik di dekat mata air panas Mapane atau di bagian timurlaut lintasan yang dikonfirmasi oleh hasil pemodelan 1-D. Fluida panas yang naik ke permukaan akan merubah sifat fisis batuan di sekitarnya sehingga menjadi tahanan jenis rendah <25 Ohm-m menjadi batuan yang telah teralterasi dan berfungsi sebagai caprock dari sistem panas bumi di daerah Pakuli.

Pada Gambar 6 menunjukkan penampang tahanan jenis lintasan 5 berarah baratlaut-tenggara dan memotong keberadaan mata air panas Mapane yang memiliki temperatur hingga 95°C . Pada lintasan 5 menghasilkan lapisan bertahanan jenis rendah <25 Ohm-m hasil pemodelan 1-D. Namun hasil pemodelan 3-D tahanan jenis rendah tersebut meluas ke arah baratlaut lintasan. Dengan mengacu kepada hasil pemodelan 1-D, kemenerusan tahanan jenis rendah tersebut ke arah baratlaut diasumsikan sebagai respon sedimen.



Gambar 4. Interpretasi peta tahanan jenis pada elevasi bervariasi Pakuli

HASIL DAN DISKUSI DAERAH BORA

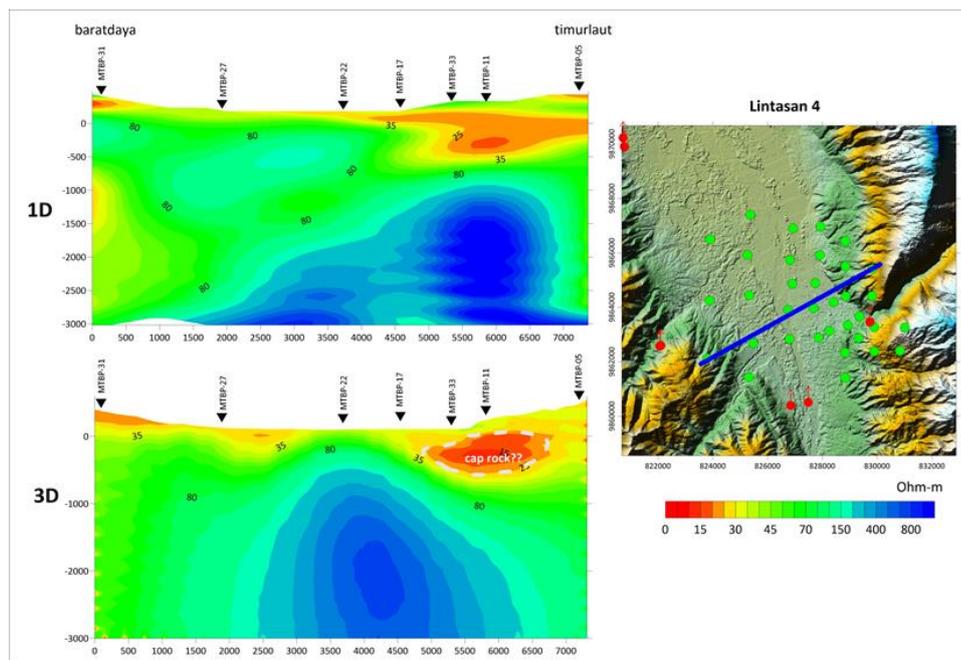
Daerah Bora berada zona depresi yang lebih lebar dibandingkan dengan daerah Pakuli yang berada selatannya. Dengan demikian akan merefleksikan tahanan jenis yang lebih luas dibandingkan daerah Pakuli. Pada peta tahanan jenis

hasil pemodelan 3-D elevasi 0 m (Gambar 7) terlihat pola sebaran tahanan jenis rendah <15 Ohm-m di bagian tengah sekitar mata air panas Bora yang melebar ke selatan melewati mata air panas Lompio yang membentuk kontur tertutup. Tahanan jenis tersebut diduga berhubungan dengan

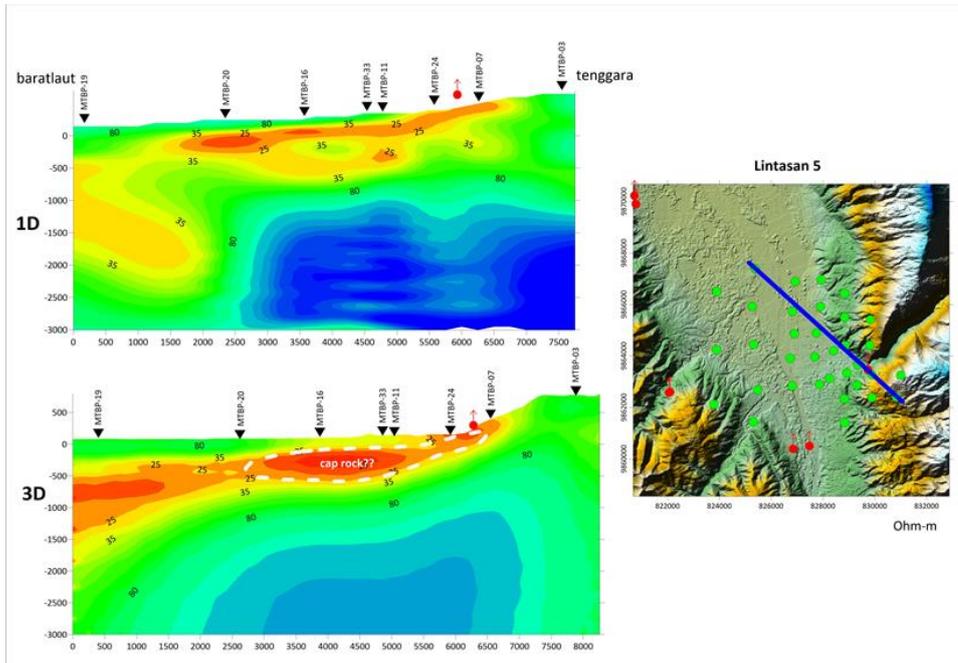
sistem panas bumi di daerah Bora. Pada elevasi -200 m, tahanan jenis rendah tersebut mulai menjadi tahanan jenis relatif sedang di bagian timur mata air panas Bora. Degradasi tahanan jenis rendah tersebut semakin meluas ke arah barat mata air panas Bora, dimana tahanan jenis rendah yang diduga sebagai batuan yang telah teralterasi dan berfungsi sebagai caprock menjadi tahanan jenis sedang pada elevasi -400 m. Sebaran tahanan jenis pada elevasi -600 m relatif memiliki pola yang sama dengan elevasi -400 m. Pada bagian barat zona depresi yang konsisten memiliki pola tahanan jenis rendah sepanjang utara-selatan diduga sebagai respon sedimen.

Pada kasus ini, batuan ubahan dan batuan sedimen dapat memberikan respon nilai tahanan jenis yang tidak jauh berbeda (dalam interval

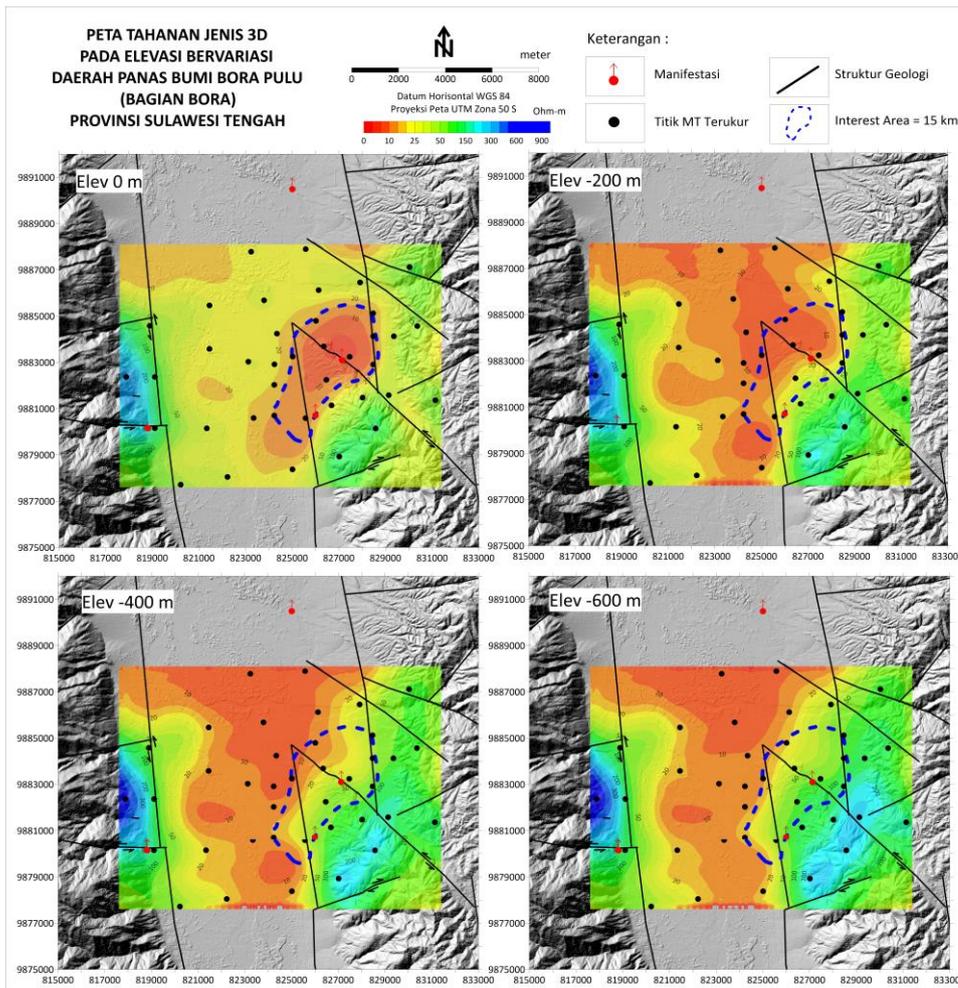
yang sama) sehingga sangat sulit untuk membedakan antara batuan sedimen dengan batuan ubahan. Dengan melakukan pemisahan anomali tahanan jenis rendah <10 Ohm-m pada Gambar 8 diharapkan dapat memisahkan respon sebagai batuan ubahan atau sedimen. Penampang tahanan jenis lintasan 2 yang berarah relatif barat-timur menghasilkan lapisan tahanan jenis rendah <10 Ohm-m sebagai lapisan batuan yang telah terubah sifat fisis batumannya oleh fluida panas yang naik ke permukaan berupa mata air panas Bora dan Lompio. Dengan melakukan pendekatan yang sama pada lintasan 6 (Gambar 9) yang berarah relatif utara-selatan juga menghasilkan lapisan tahanan jenis <10 Ohm-m yang merupakan bagian dari lapisan penutup pada sistem panas bumi di daerah Bora.



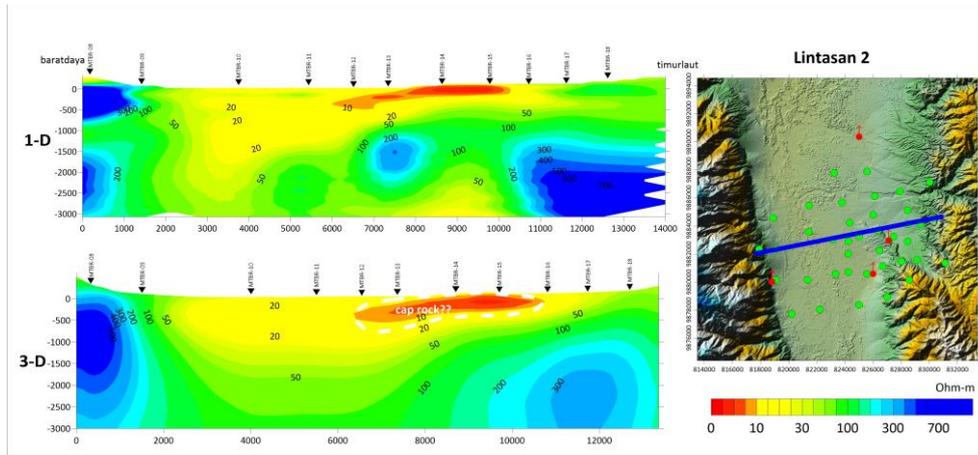
Gambar 5. Model 3-D tahanan jenis lintasan 4 Pakuli



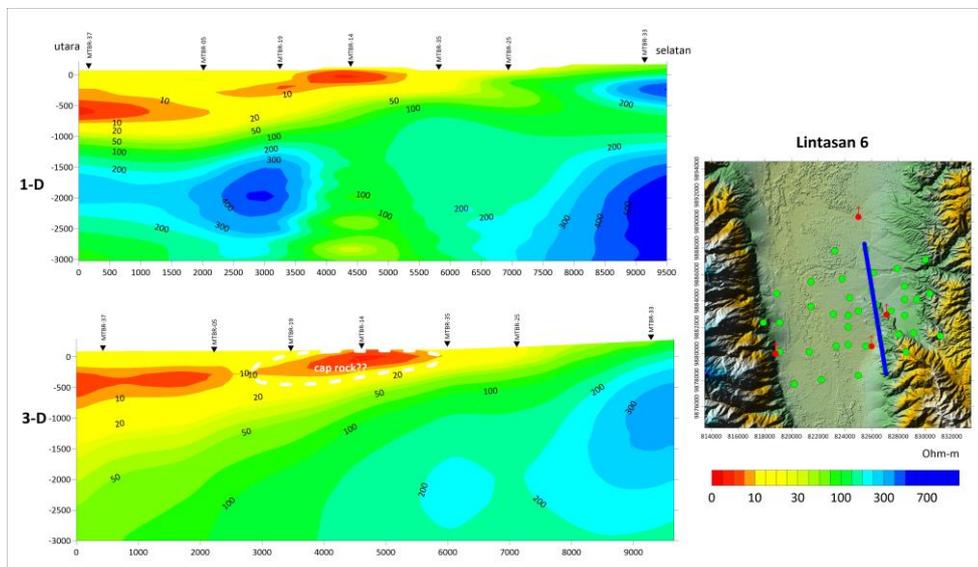
Gambar 6. Model 3-D tahanan jenis lintasan 5 Pakuli



Gambar 7. Interpretasi peta tahanan jenis pada elevasi bervariasi Bora



Gambar 8. Interpretasi Penampang lintasan 2 MT Bora



Gambar 9. Interpretasi Penampang lintasan 6 MT Bora

KEPROSPEKAN DAN POTENSI PANAS BUMI

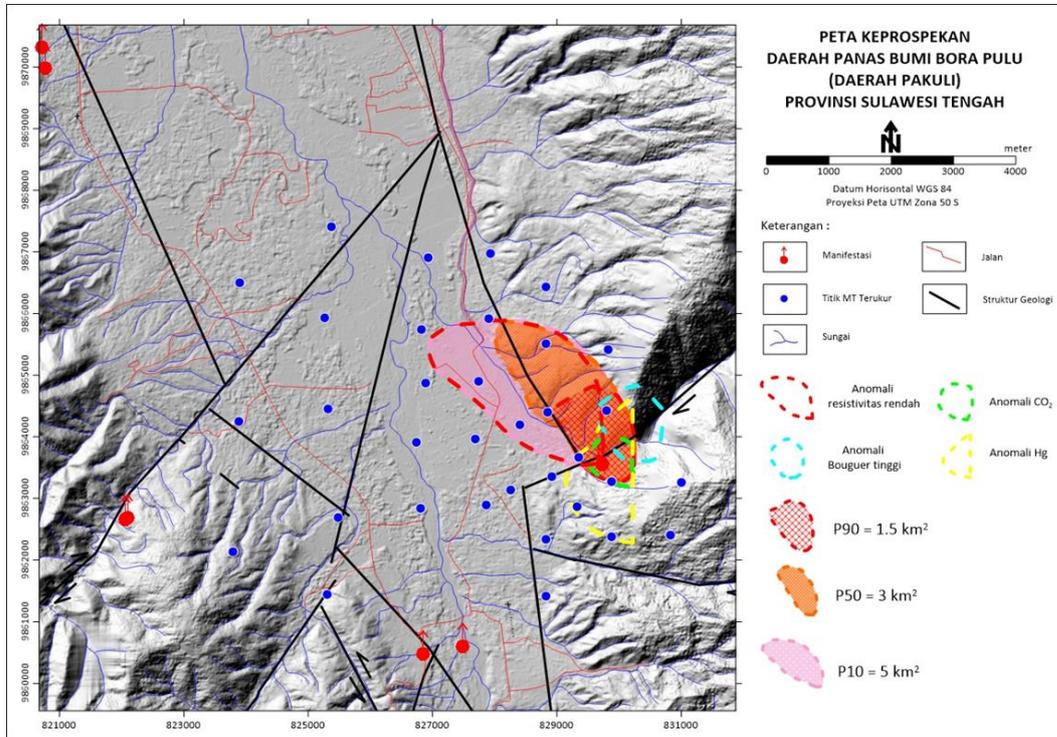
Deliniasi daerah prospek panas bumi Bora Pulu ditentukan berdasarkan kompilasi dari metode geologi, geokimia, dan geofisika. Perhitungan kedua daerah Bora dan Pakuli dilakukan perhitungan potensi secara terpisah. Hasil kompilasi daerah Pakuli menunjukkan bahwa area prospek panas bumi terletak sekitar mata air panas Mapane dan meluas ke arah barat laut daerah penyelidikan. Adapun luas

area prospek minimum 1.5 km², *most likely* 3 km² an maksimum sebesar 5 km² (Gambar 10). Sedangkan hasil kompilasi daerah Bora menunjukkan bahwa area prospek panas bumi berada sekitar mata air panas Bora dan meluas ke arah barat dan ke arah mata air panas Lompio. Adapun luas area prospek minimum 8 km², *most likely* 10.5 km² an maksimum sebesar 15 km² (Gambar 11).

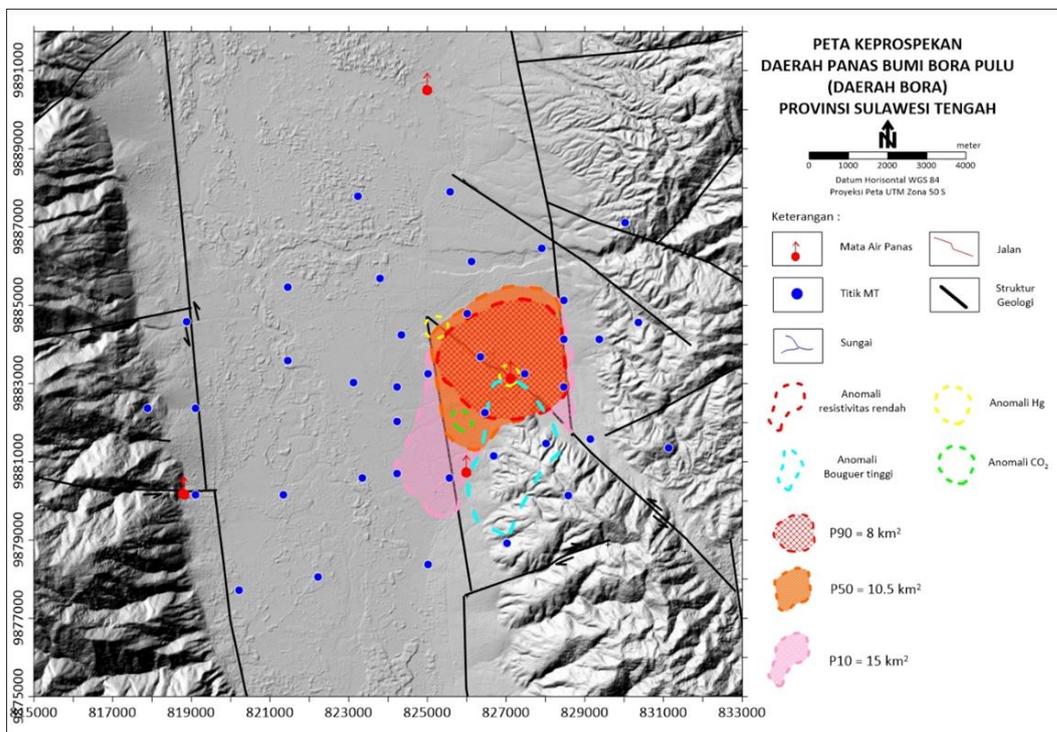
Perhitungan dengan metode simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa daerah

panas bumi Bora Pulu memiliki sumber daya panas bumi sebesar 13 MWe (P 50) di di daerah Pakuli (Gambar 12) dan

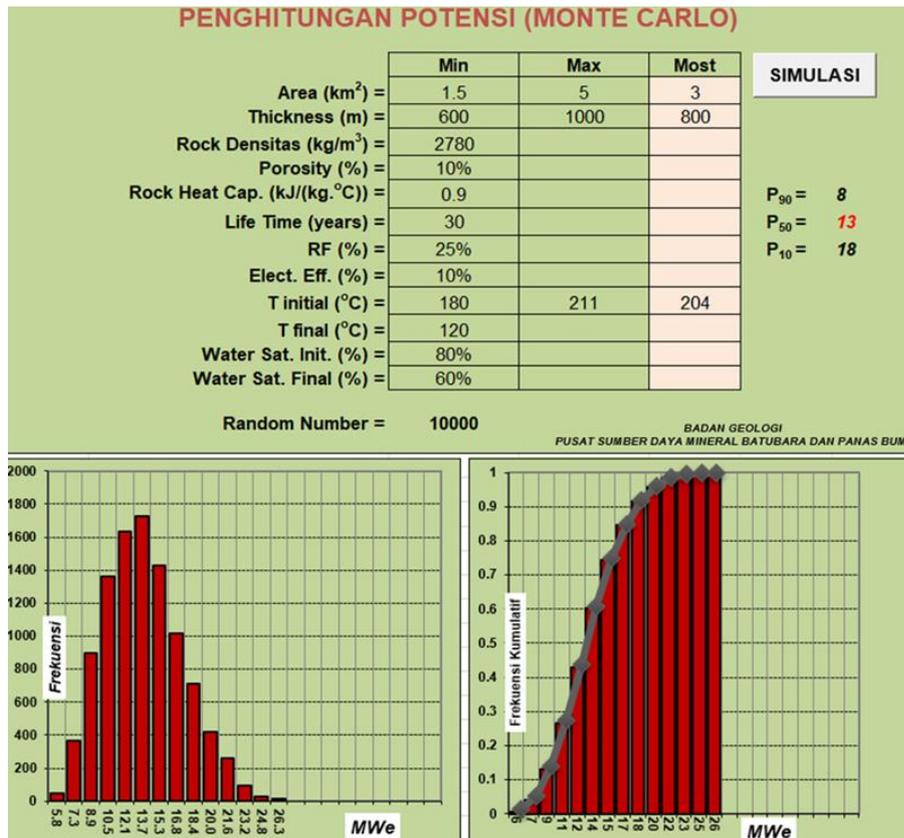
sebesar 39 MWe di daerah Bora (Gambar 13) pada kelas cadangan mungkin dengan kategori reservoir temperatur sedang.



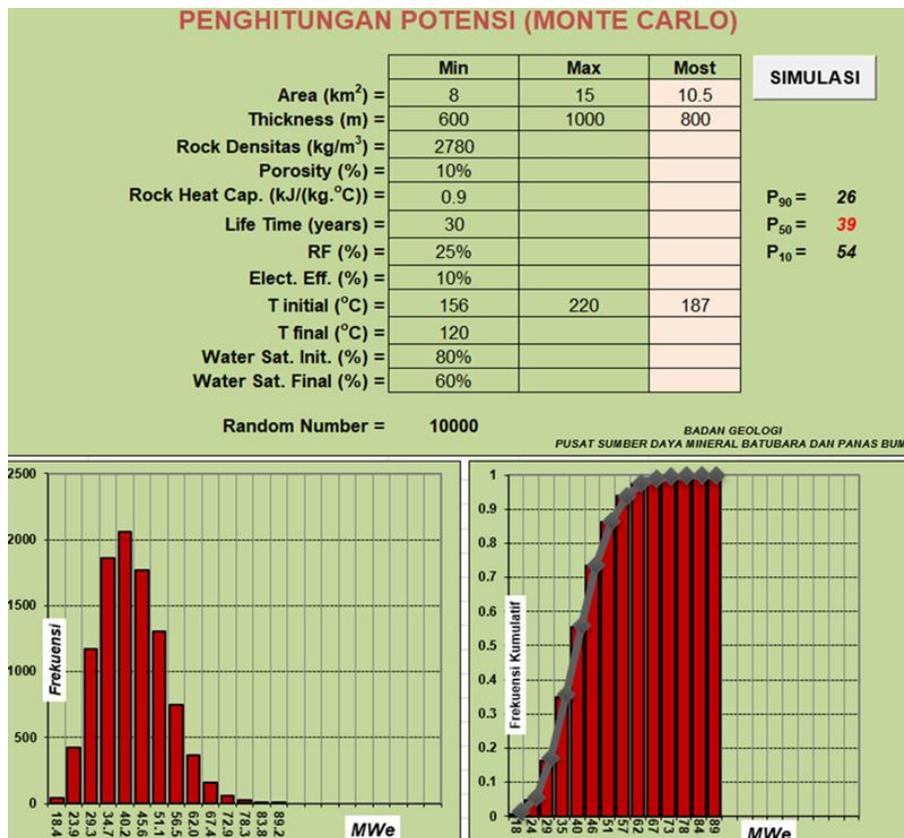
Gambar 10. Peta keprospekian daerah panas bumi Pakuli



Gambar 11. Peta keprospekian daerah panas bumi Bora



Gambar 12. Perhitungan potensi panas bumi daerah Pakuli



Gambar 13. Perhitungan potensi panas bumi daerah Bora

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan data Magnetotellurik (MT), keberadaan lapisan konduktif yang diduga sebagai lapisan penudung dari sistem panas bumi Bora Pulu menghasilkan dua luasan prospek. Luasan pertama berada relatif di bagian utara yaitu di sekitar manifestasi panas Bora dan luasan kedua berada relatif di bagian selatan yaitu di sekitar manifestasi Mapane. Daerah Bora memiliki luasan prospek sebesar 15 km² (P50), sedangkan daerah Pakuli memiliki luasan sebesar 3

km² (P50). Keberadaan top reservoir dari sistem panas bumi di daerah Bora dan Pakuli diduga berada pada elevasi -500 m, atau dengan kata lain berada pada kedalaman 600 m. Perhitungan dengan metode simulasi Monte Carlo **Error! Reference source not found.** daerah panas bumi Bora Pulu memiliki sumber daya panas bumi sebesar 13 MWe (P 50) di di daerah Pakuli dan sebesar 39 MWe di daerah Bora pada kelas cadangan mungkin dengan kategori reservoir temperatur sedang.

DAFTAR PUSTAKA

- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting: *Geophysics*, 18, 605-635.
- Cumming, W., dan Mackie, R., 2010, Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D, and 3D MT Inversion as TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History, *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 2529 April 2010.
- Eypórssson, E., 2015, The Transient Electromagnetic method (TEM) in geothermal exploration. Processing and 1D inversion of a TEM sounding from Reykjanes, SW-Iceland, Faculty of Earth Sciences, University of Iceland
- Larsen, J. C., 1975, Low frequency (0.1-6.0 cpd) electromagnetic study of the deep mantle electrical conductivity beneath the Hawaiian Island: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 43, 17-46.
- Miensopust, M.P., Queralt, P., dan Jones, A.G., 2013, Magnetotelluric 3-D Inversion - a Review of Two Successful Workshops o Forward and Inversion Code Testing and Comparison, *Geophys. J. Int.* (2013) 193, 1216 - 1238, Advance Access Publication 2013 March 13.
- Simpson, F., dan Bahr, K., 2005, *Practical Magnetotellurics*, Georg - August - Universitat, Gottingen, Cambridge University Press

- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 211 p.
- Stenberg, B.K., Washburne, J.C., dan Pellerin, L., 1988, Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings, *Geophysics, Vol 53 No 11*
- Tietze, K., dan Ritter, O., 2013, 3D Magnetotelluric Inversion in Practice - The electrical Conductivity Structure of the San Andreas Fault in Central California.
- Tikhonov, A. N. (1950). The determination of the electrical properties of deep layers of the Earth's crust. Dokl. Acad. Nauk. SSR 73: 295–297
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins: *Geophysics*, 37, 98-141.
- Wannamaker, P. E., 1983, Resistivity structure of the Northern Basin and Range, in *The role of heat in the development of energy and mineral resources in the Northern Basin and Range Province: Geothermal Resources Council, Special Rep., 13, 345-362*
- Word, D. R., Smith, H. W., dan Bostick, F. X., Jr., 1970, An investigation of the magnetotelluric tensor impedance method: Elec. Geophys. Res. Lab. Report 82, Elec. center, Univ. of Texas at Austin, 264 p.

SURVEI RINCI GEOLOGI DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON RIA RIA KABUPATEN TAPANULI UTARA, PROVINSI SUMATERA UTARA

Robertus S L Simarmata, Yadi Supriyadi, dan Dudi Hermawan

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Sipoholon Ria-Ria secara administratif terletak di wilayah Kecamatan Sipoholon dan Kecamatan Tarutung, Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera Utara. Survei rinci geologi dilakukan untuk mendapatkan data struktur geologi, mineral ubahan dan batuan dengan tujuan untuk mengidentifikasi peranan struktur geologi terhadap zona permeabilitas dalam sistem panas bumi, penyebaran, jenis, dan zonasi mineral ubahan di permukaan, serta estimasi umur batuan atau proses hidrotermal yang terjadi.

Daerah panas bumi Sipoholon berada pada morfologi datar hingga curam. Litologi yang menyusun daerah panas bumi Sipoholon adalah Satuan Batulempung Bohorok dan Satuan Granit Rura Julu sebagai batuan alas, Satuan Dasit Sitakka, Satuan Andesit Sandaran, Satuan Andesit Palangka Gading, Satuan Andesit Sibaragas, Satuan Andesit Sitarindak, Satuan Andesit Sipahutar, Satuan Andesit Imun yang tertutupi oleh Satuan Tuf Toba dan Aluvial.

Struktur geologi berupa sesar yang berada di tengah daerah survei adalah bagian dari Sesar Sumatera dan daerah Sipoholon berada di bagian *pull-apart basin* Tarutung yang merupakan suatu zona lemah yang memungkinkan zona di dalamnya memiliki suatu permeabilitas yang tinggi.

Daerah panas bumi Sipoholon diidentifikasi berdasarkan kehadiran mata air panas dengan temperatur 34,8-64,5°C. Daerah panas bumi Sipoholon termasuk sistem panas bumi non-vulkanik dengan transfer panas melalui mekanisme *heat sweep*.

Kata kunci: panas bumi, *pull-apart Basin*, Sipoholon, permeabilitas

PENDAHULUAN

Pengembangan dan pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia masih memiliki banyak tantangan. Selain upaya pemerintah untuk mengoptimalkan

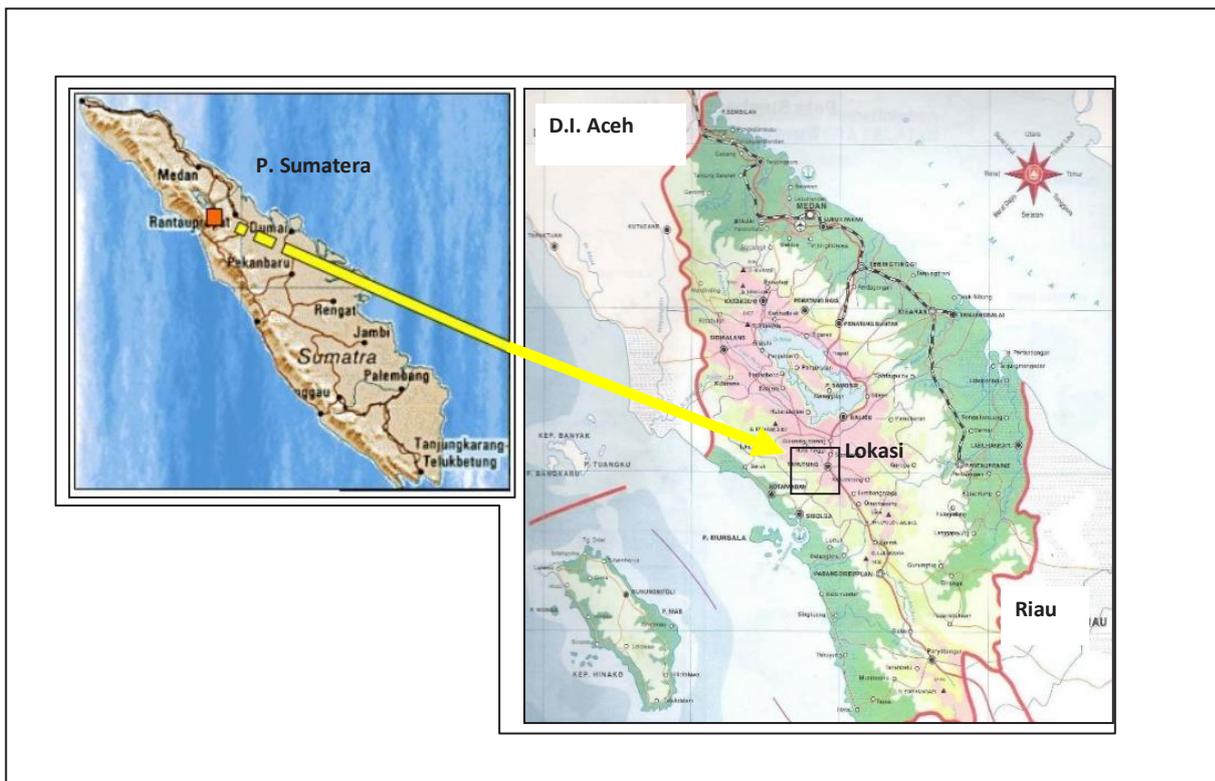
pemanfaatan potensi panas bumi di Indonesia, untuk menarik investasi dengan menyediakan serentetan insentif, PSDMBP dengan salah satu tugas dan fungsinya untuk melakukan penyelidikan panas bumi,

juga melakukan peningkatan kualitas data terhadap lokasi-lokasi yang menjadi prioritas

Pada tahun 2023, Pemerintah melaksanakan program kegiatan eksplorasi panas bumi di beberapa daerah untuk mendorong pengembangan panas bumi di Indonesia. Adapun salah satu daerah tersebut adalah WKP Sipoholon. WKP Sipoholon sebelumnya telah masuk dalam usulan WKP dan ditetapkan menjadi WKP namun hingga saat ini belum ada pengembang yang menunjukkan keseriusan untuk melakukan pengembangan di area tersebut. Oleh karena itu untuk mendorong pengembangan panas bumi daerah ini, pemerintah melakukan penambahan data

di utara area prospek berdasarkan penyelidikan sebelumnya tahun 2017. Dengan penambahan data tersebut diharapkan dapat mengurangi resiko eksplorasi dan menambah daya tarik pengembangan di area tersebut.

Survei difokuskan di sekitar area prospek panas bumi dan daerah sekitar Sipoholon Ria-Ria. Secara geografis berada pada $1^{\circ} 59' 25,421''$ s.d. $2^{\circ} 11' 54,539''$ LU dan $98^{\circ} 51' 22,053''$ – $99^{\circ} 5' 56,135''$ BT atau antara 484000 mT hingga 511000 mT dan 220000 mU hingga 243000 mU pada sistem UTM zona 47, belahan bumi utara. Secara administratif terletak di wilayah Kecamatan Sipoholon dan Kecamatan Tarutung, Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera utara (Gambar 1).



Gambar 1. Peta indeks lokasi daerah Daerah Panas Bumi Sipoholon-Riaria

Survei geologi rinci di daerah panas bumi Sipoholon Ria-Ria ini bermaksud untuk mendapatkan data struktur geologi, mineral ubahan dan batuan dengan tujuan untuk mengidentifikasi peranan struktur geologi terhadap zona permeabilitas dalam sistem panas bumi, penyebaran, jenis, dan zonasi mineral ubahan di permukaan, serta estimasi umur batuan atau proses hidrotermal yang terjadi, sebagai upaya melengkapi data dan informasi sebelumnya.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan pada tahun 2017 telah membagi wilayah hutan yang ada di daerah rencana survei ke dalam 4 wilayah, yaitu hutan lindung, hutan produksi, hutan produksi terbatas, dan area penggunaan lain. Berdasarkan pembagian wilayah kehutanan tersebut, area prospek panas bumi Sipoholon yang berada di bagian timur dan tengah daerah rencana survei, terdiri dari area penggunaan lain, hutan produksi, dan hutan produksi terbatas.

METODOLOGI

Terdapat tiga tahapan survei geologi yang dilakukan, yaitu studi literatur, survei lapangan, dan pengolahan data serta analisis laboratorium. Studi literatur dilakukan sebelum survei lapangan, bertujuan untuk mempelajari/mengumpulkan data yang relevan dari hasil penyelidikan terdahulu sebagai pendukung kegiatan survei. Dalam tahapan ini dilakukan pengolahan data citra

satelit dan Digital Elevation Model (DEM) untuk melokalisasi area fokus survei geologi. Hasil analisis citra dan DEM akan memberikan gambaran singkat mengenai struktur geologi daerah survei, dan alterasi hidrotermal di permukaan. Tahapan ini menghasilkan kerangka berpikir dan efisiensi cara kerja di lapangan yang lebih terarah.

Survei lapangan terdiri dari:

- 1) Pengamatan
 - a) pengamatan manifestasi panas bumi seperti jenis, luas daerah dan batuan sekitarnya,
 - b) pengamatan jenis batuan dan penyebarannya,
 - c) pengamatan struktur geologi dilakukan melalui pengamatan langsung di lapangan terhadap gejala struktur seperti rekahan, kelurusan lembahan dan punggung, topografi, kekar, cermin sesar, offset, triangulasi, gawir dan air terjun
 - d) pengamatan sifat fisik batuan ubahan dan penyebarannya
- 2) Pengukuran
 - a) pengukuran koordinat, letak dan posisi serta luas daerah manifestasi,
 - b) pengukuran kedudukan (jurus dan kemiringan) batuan,
 - c) pengukuran struktur bidang berupa jurus/kemiringan (strike/dip) dalam bentuk cermin sesar, gores garis, kekar, struktur garis dalam bentuk penunjaman (plunge) dan arah penunjaman (trend)

serta kelurusan berupa breksiasi, kelurusan lembah, punggungan.

3) Pengambilan Conto

Pengambilan conto batuan dilakukan secara selektif terhadap batuan yang dianggap representatif. Conto batuan berupa batuan segar maupun batuan ubahan hasil proses hidrotermal untuk selanjutnya dianalisis di laboratorium.

4) Pengolahan Data

Data yang diperoleh di lapangan kemudian diplot dalam peta kerangka geologi, berupa data lokasi titik pengamatan, pengambilan conto batuan, kedudukan batuan, kedudukan struktur geologi, dan lokasi serta penyebaran batuan alterasi.

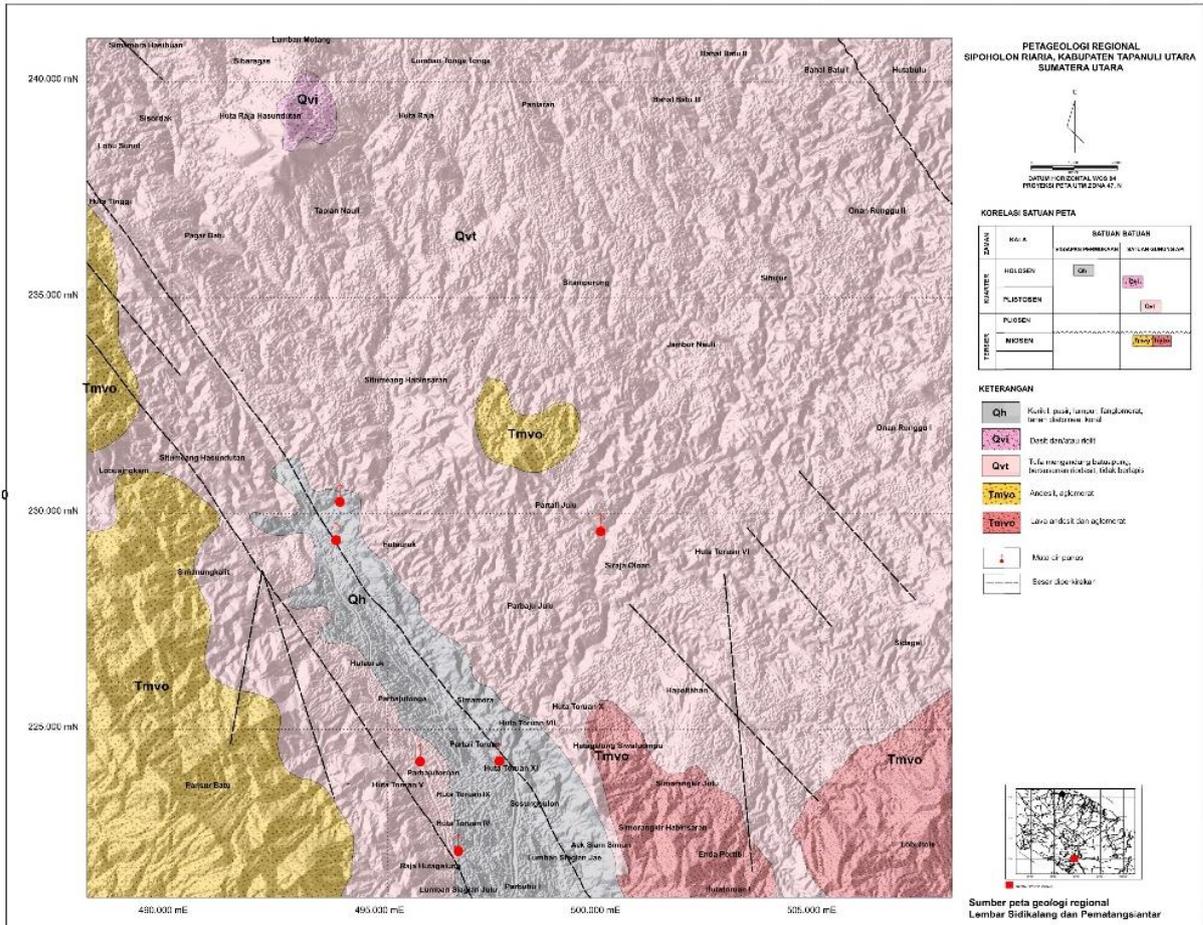
GEOLOGI REGIONAL

Aktivitas tektonik daerah panas bumi Sipoholon secara regional dipengaruhi oleh kegiatan tektonik pergerakan lempeng – lempeng utama yaitu Eurasia di utara dan Hindia Australia di selatan yang membentuk busur magmatik, terlihat dari adanya sabuk gunungapi berumur Paleogen sampai Resen yang terbentuk di atas zona Benioff. Sabuk gunungapi ini membentang dari ujung utara Sumatera sampai Teluk Semangko di bagian selatan. Batuan-batuan vulkanik di daerah Sipoholon diperkirakan berasal dari 5 buah pusat titik erupsi yang berbeda, yaitu Dolok Martimbang, Dolok Palangka Gading,

Gunung Api Tua Toba, Dolok Siborboron dan Dolok Jorbing. Batuan sedimennya berupa endapan karbonat sinter, sedangkan endapan permukaan berupa satuan batuan aluvium. Batuan vulkanik yang tersingkap termasuk jenis vulkanik tua berumur Tersier dan mempunyai penyebaran yang luas, sedang dari produk vulkanik muda Toba mendominasi hampir seluruh daerah panas bumi Sipoholon. Batuan tua berumur Tersier yang tersingkap di bagian barat maupun yang di bagian timur diperkirakan sebagai alas (*basement*).

Litologi batuan daerah panas bumi Sipoholon mulai dari yang tertua sampai termuda adalah: satuan aliran lava Jorbing (Tmlj), satuan aliran lava Siborboron (Tmlsb), satuan piroklastik Toba 1 (Qvt), satuan piroklastik Toba 2 (Qvt), satuan aliran lava Palangka Gading (Qvpg), satuan kubah lava Martimbang (Qvma), sinter karbonat (Qgs) dan aluvial (Qal).

Struktur geologi daerah ini secara regional termasuk dalam zona Sesar Sumatera yang melintang mulai dari Sabang di utara sampai Teluk Semangko di selatan. Struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian didominasi oleh sesar-sesar normal dengan arah umum barat-laut–tenggara, sehingga membentuk zona depresi Tarutung yang mengontrol pemunculan manifestasi air panas ke permukaan.



Gambar 2. Peta geologi regional daerah panas bumi Sipoholon-Riaria (Modifikasi J.A Aspeden, dkk (1982))

HASIL SURVEI

Analisis Densitas Kelurusan

Analisis kelurusan di daerah penyelidikan dilakukan dengan menggunakan peta dasar berupa data DEMNAS dan untuk melakukan analisis kelurusan, perlu dilakukan metode analisis kerapatan struktur (*Fracture Fault Density*) agar dapat diketahui suatu anomali berdasarkan banyaknya kecenderungan kelurusan di suatu wilayah. Anomali ini memberikan gambaran struktur geologi yang paling intensif untuk daerah tersebut.

Berdasarkan analisis kelurusan di daerah Sipoholo Ria-Ria, arah umum kelurusan yang ditunjukkan oleh diagram bunga (Gambar 3) menunjukkan orientasi kelurusan secara umum berarah umum utara-selatan. Sedangkan analisis densitas kelurusan menunjukkan adanya kecenderungan densitas tinggi dengan arah barat-laut-tenggara (Gambar 4a). Berdasarkan analisis densitas kelurusan lokasi manifestasi panas bumi di daerah panas bumi Sipoholon tidak berada pada nilai densitas kelurusan yang tinggi. Anomali tinggi pada analisis densitas

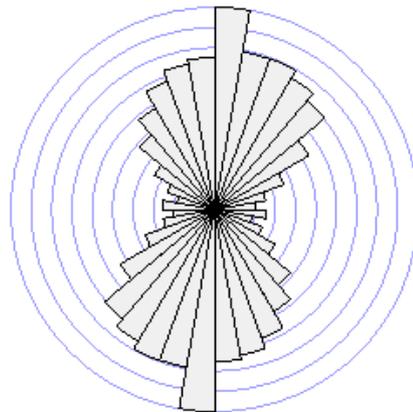
kelurusan diharapkan merupakan suatu zona permeabel yang mengontrol sistem panas bumi di daerah Sipoholon-Riaria.

Analisis Distribusi Suhu Permukaan

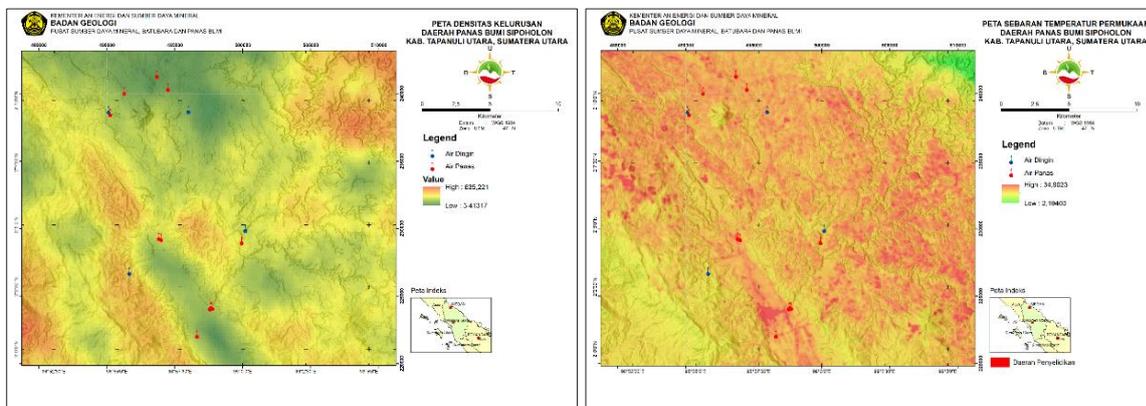
Analisis distribusi suhu permukaan/*Land Surface Temperature* (LST) merupakan salah satu pengolahan citra LANDSAT-8 OLI yang memanfaatkan saluran (*band*)-10 dengan dengan panjang gelombang 10,60 – 11,19 dan saluran-11 dengan panjang gelombang 11,50 – 12,51 yang memiliki rentang *Thermal Infrared Sensor* (TIRS).

Hasil analisis distribusi suhu permukaan atau dikenal juga dengan *Land*

Surface Temperature (LST) yang terdapat di daerah Sipoholon, memperlihatkan adanya kisaran temperatur antara 2-31°C. Di area survei, mata air panas berada di anomali panas tinggi (Gambar 4b). Anomali panas tinggi umumnya tersebar di daerah panas yang berupa daerah pemukiman dan daerah alluvial yang memungkinkan menyerap dan memantulkan panas matahari dengan sangat baik dibandingkan dengan daerah dengan tutupan vegetasi yang lebih lebat. Anomali panas tinggi di daerah manifestasi bisa jadi berasal dari aktivitas panas bumi di sekitar manifestasi.



Gambar 3. Diagram Bunga Kelurusan di Daerah Sipoholon



Gambar 1. a. Peta Densitas Kelurusan dan b. Peta Distribusi Suhu Permukaan Daerah Panas Bumi Sipoholon

Geomorfologi

Berdasarkan hasil analisis peta geomorfologi yang dilakukan menggunakan kombinasi data morfometri, morfografi dan morfogenesis, disimpulkan bahwa daerah survei diklasifikasikan menjadi 4 satuan geomorfologi secara umum berdasarkan Van Zuidam.1983 (Gambar 5), yaitu:

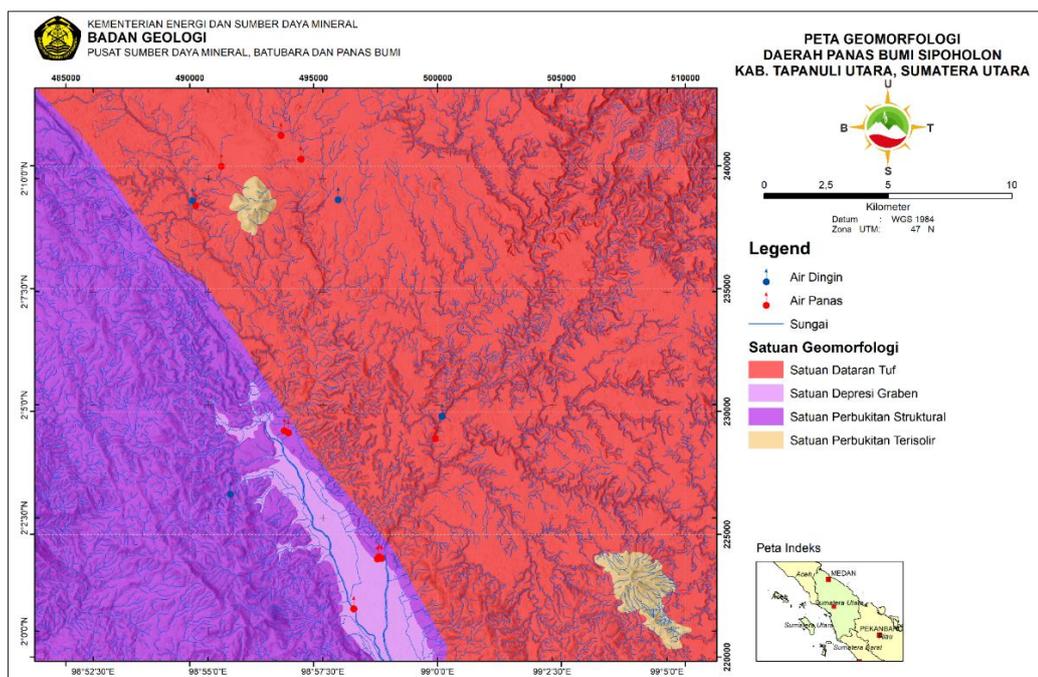
Satuan Dataran Tuf meliputi 55% daerah survei dengan litologi penyusun berupa tuf, terdiri atas pedataran dan daerah dengan kemiringan landai di sekitar aliran sungai. Satuan ini menempati bagian timur-timurlaut daerah survei.

Satuan Depresi Graben meliputi 2% daerah survei dengan litologi penyusun berupa alluvial. Terdapat atas pedataran di antara dinding Sesar Sumatera di sebelah barat dan timurnya. Pada satuan ini, sungai

memiliki lembah berbentuk U lebar, hal tersebut menandakan proses erosi lateral lebih dominan daripada erosi vertikal.

Satuan Perbukitan Terisolir meliputi 1% daerah survei dengan litologi penyusun berupa dasit dan andesit. Satuan ini dapat ditemukan di Dolok Imun dan Sitarindak. Satuan ini memiliki kemiringan agak landai hingga agak curam.

Satuan Perbukitan Struktural meliputi 42% daerah survei dengan litologi andesit, dasit, tuf, dan granit. Terdapat atas Perbukitan Agak Landai, Perbukitan Landai, Perbukitan Agak Curam dan Perbukitan Curam. Satuan ini umumnya menempati di bagian barat daerah survei dengan struktur geologi yang sangat intensif. Sungai pada satuan ini membentuk huruf V tajam, proses erosi vertikal lebih dominan dibandingkan erosi lateral



Gambar 5. Peta Geomorfologi Daerah Sipoholon

Stratigrafi

Stratigrafi daerah survei menggunakan penamaan tidak resmi. Daerah survei dibagi menjadi 10 (sepuluh) satuan batuan tidak resmi. Dari tua ke muda adalah:

Satuan Batulempung Bohorok (Pub) tersusun atas batulempung berwarna segar abu-abu hingga kemerahan, ukuran butir lempung, sedikit lengket. Batulempung Bohorok diperkirakan sebagai batuan alas di daerah survei. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Bohorok yang berumur Kapur Akhir.

Satuan Granit Rura Julu (Mpg) tersusun atas granit berwarna segar putih kecoklatan, bertekstur fanerik dengan mineral penyusun kuarsa, plagioklas, k-felspar, dan hornblende, terkekarkan kuat. Satuan ini dapat ditemukan di sebelah baratdaya daerah survei. Satuan ini dibandingkan dengan Kompleks Sibolga yang berumur Perem Akhir sampai Trias Akhir (Aldiss, dkk., 1983). Satuan ini diperkirakan merupakan batuan alas di daerah survei.

Satuan Dasit Sitakka (Tmds) tersusun atas dasit berwarna segar putih, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, plagioklas yang tertanam dalam massa dasar mineral felsik, terkekarkan kuat. Satuan ini dapat ditemukan di sekitar air terjun Sitakka. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Sandaran (Tmas) tersusun atas andesit berwarna abu-abu kecoklatan, lapuk, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, hornblenda yang tertanam dalam massa dasar mineral mafik, terkekarkan kuat. Ukuran hornblenda satuan ini memiliki ukuran yang lebih besar dari mineral lainnya. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Palangka Gading (Tmapg) tersusun andesit berwarna abu-abu kecoklatan, lapuk, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, hornblenda yang tertanam dalam massa dasar mineral mafik, terkekarkan kuat. Satuan ini dapat ditemukan di puncak Dolok Palangka Gading. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Sibaragas (Tmasb) tersusun andesit berwarna abu-abu kecoklatan, lapuk, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, hornblenda yang tertanam dalam massa dasar mineral mafik, terkekarkan kuat. Satuan ini dapat ditemukan di daerah Pansur Batu di sebelah baratdaya daerah survei. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Sitarindak (Tmast) tersusun andesit berwarna abu-abu kecoklatan, lapuk, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, hornblenda

yang tertanam dalam massa dasar mineral mafik, terkekarkan kuat. Satuan ini dapat ditemukan di daerah Sitarindak. Satuan ini disetarakan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Sipahutar (Tmasp) tidak ditemukan singkapan di permukaan. Satuan ini diidentifikasi berdasarkan morfologi melingkar dari pengamatan citra, densitas tinggi pada anomali gaya berat, serta dibandingkan dengan Formasi Gunungapi Toru yang berumur Miosen Tengah pada Lembar Sidikalang (Aldiss, dkk., 1983).

Satuan Andesit Imun (Qai) tersusun atas andesit berwarna coklat keputihan, lapuk, bertekstur afanitik, tersusun atas kuarsa, k-felspar, plagioklas yang tertanam dalam massa dasar mineral felsik, telah teroksidasi kuat. Satuan ini dapat ditemukan di Dolok Imun. Satuan ini disetarakan dengan Pusat Imun yang berumur Plistosen (Aldiss, dkk., 1983).

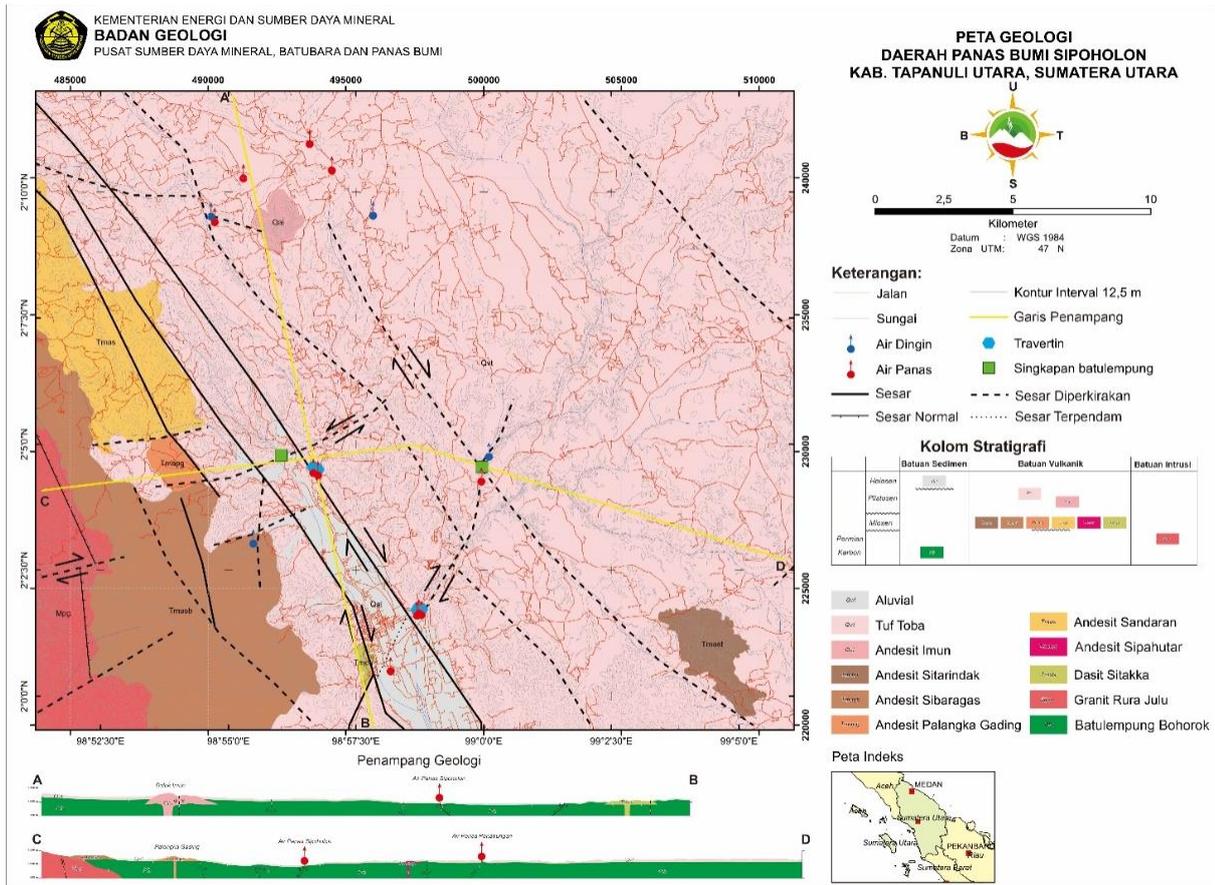
Satuan Tuf Toba (Qvt) tersusun atas tuf berwarna putih segar, berukuran debu-bom, kemas terbuka, pemilahan baik, fragmen polimik yang tersusun atas skoria, andesit, kristal dengan matriks debu. Satuan ini melampar luas menutupi satuan yang lebih tua. Satuan ini disetarakan dengan Tufa Toba yang berumur Plistosen

(Aldiss, dkk., 1983) dan Youngest Toba Tuff (YTT) menurut Chesner (1998) berumur sekitar 74.000 tahun.

Aluvium (Qal) yang terdiri dari aluvial yang ditunjukkan dengan warna abu-abu di peta. Satuan ini menempati bagian tengah - selatan daerah survei. Satuan ini terdiri dari material lepas-lepas polimik yang terdiri dari tuf, pasir, kuarsa, andesit dengan ukuran kerikil s.d. bongkah. Pembentukan satuan ini masih berlangsung saat survei dilakukan.

Sebaran litologi ditampilkan pada peta geologi daerah survei yang di-overlay-kan dengan interpretasi struktur geologi (Gambar 6).

Struktur geologi daerah Sipoholon ditentukan berdasarkan bukti pengamatan lapangan dan analisis citra Digital Elevation Model (DEM). Berdasarkan data kelurusan yang diinterpretasikan sebagai sebuah rekahan atau bagian dari zona patahan (sesar), didapatkan arah struktur geologi di daerah survei memiliki arah umum baratlaut-tenggara yang merupakan segmen Sesar Sumatera dan timurlaut-baratdaya. Sesar-sesar di daerah Sipoholon umumnya berkorelasi dengan kehadiran Sesar Sumatera. Putra dan Husein (2016) menyebutkan bahwa Cekungan Tarutung-Sarulla merupakan suatu *pull-apart basin*.



Gambar 6. Peta Geologi Daerah Panas Bumi Sipoholon

Struktur Geologi

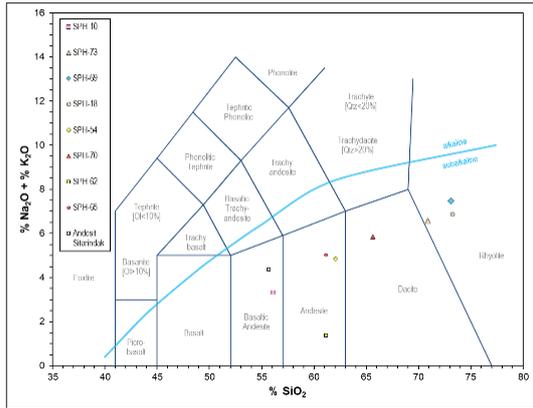
Batuan Ubahan

Berdasarkan pemetaan alterasi yang telah dilaksanakan di daerah Sipoholon, terdapat alterasi yang berdasarkan himpunan mineral yang hadir pada saat melakukan deskripsi mineral di lapangan termasuk ke dalam zona argilik (Corbett, G., & Leach, T., 1997).

Geokimia Batuan

Berdasarkan hasil analisis XRF (X-Ray Fluorescence), komposisi kimia batuan produk vulkanik di daerah survei menunjukkan komposisi intermediet hingga asam.

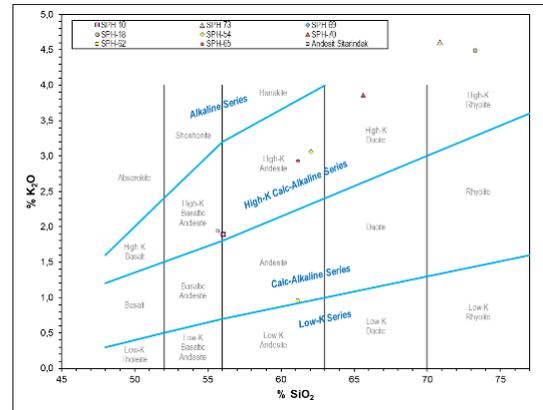
Berdasarkan analisis diagram antara $\%Na_2O + \%K_2O$ dan $\%SiO_2$ (Gambar 7), didapatkan bahwa batuan di daerah survei bervariasi dari riolit hingga andesit basaltik. SPH-10 (Gunung Imun) dan Andesit Sitarindak merupakan batuan andesit basaltis. Sampel pada stasiun SPH-54 (Andesit Sibaragas), SPH-62 (Andesit Sandaran), dan SPH-65 (Tuf Toba) merupakan batuan andesit. Sampel pada stasiun SPH-70 yang ditemukan di Air Terjun Sitakka merupakan batuan dasit. Sampel batuan pada SPH-18 (Tuf Toba), SPH-69 (Granit Rura Julu), dan SPH-73 (sekitar mata air panas Panabungan) merupakan batuan berkomposisi riolit.



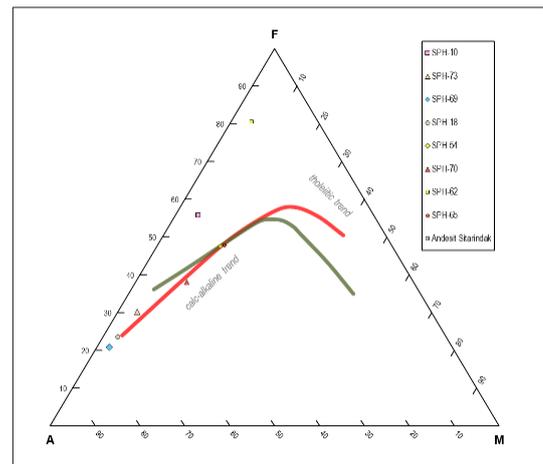
Gambar 7. Diagram Hubungan SiO_2 dengan $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

Untuk mengetahui afinitas magma pembentuk batuan di daerah survei maka digunakan diagram K_2O terhadap SiO_2 (Peccerillo dan Taylor, 1976 dalam Harahap, 2007) pada Gambar 8 dan diagram AFM (Irvine dan Baragar, 1971 dalam Harahap, 2007) pada Gambar 9. Berdasarkan hasil pengeplotan data kimia oksida utama pada kedua diagram tersebut menunjukkan bahwa afinitas magma batuan di daerah survei termasuk dalam *tholeiitic* hingga *calc-alkaline*. Wilson (2007) menyebutkan bahwa magma seri *tholeiitic* dapat terbentuk pada berbagai tatanan tektonik, sedangkan magma seri *calc-alkaline* hanya terbentuk pada tatanan tektonik subduksi, seperti terjadi pada lingkungan tektonik di daerah busur kepulauan (*island arc*) atau tepian kontinen aktif (*active continental margin*). Hartono (1994) menjelaskan bahwa batuan yang terbentuk di daerah busur kepulauan merupakan batuan basaltik-andesitik, sedangkan batuan yang terbentuk pada

daerah tepian kontinen aktif berupa batuan asam seperti dasit dan riolit.



Gambar 8. Diagram Hubungan SiO_2 dengan K_2O

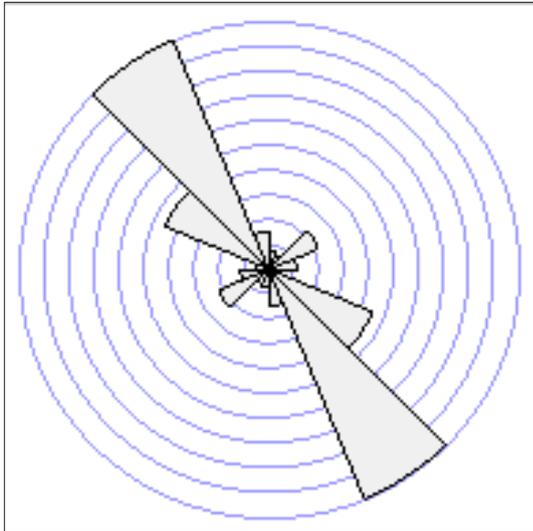


Gambar 9. Perbandingan antara kandungan $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$, $\text{FeO} - \text{MgO}$ (Modifikasi dari Irvine dan Baragar, 1971 dalam Harahap, 2007)

PEMBAHASAN

Secara umum, kelurusan di daerah panas bumi Sipoholon memiliki arah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut (Gambar 10). Orientasi kelurusan berarah baratlaut-tenggara merupakan arah umum dari Sesar Sumatera. Sedangkan orientasi

baratdaya-timurlaut representasi dari sesar yang kemungkinan adalah antitetik dari Sesar Sumatera.



Gambar 10. Diagram Bunga Orientasi Kelurusan

Daerah Sipoholon berada di bagian *pull-apart basin* Tarutung. Hal tersebut dapat dikenali berdasarkan geometri dari DEM yang memanjang dari Sipoholon hingga Kota Tarutung dengan arah baratlaut-tenggara. Arah tersebut juga sejajar dengan orientasi kelurusan yang menghubungkan Dolok Imun, Sipahutar, dan Sitarindak. Pada dinding sisi sebelah timur dari *pull-apart basin* Tarutung muncul air panas dengan debit yang cukup besar dan terdapat endapan travertin, yaitu mata air panas Sipoholon dan Hutabarat. Di sebelah timur mata air panas Sipoholon juga muncul mata air panas Panabungan dengan debit yang cukup besar juga. Mata air panas Panabungan juga dikontrol oleh sesar dengan arah jurus yang sama.

Nukman dan Hochstein (2019) menggambarkan bahwa *pull-apart basin* Tarutung merupakan suatu *flower structure*, sehingga akan sangat memungkinkan bahwa dinding timur *pull-apart basin* Tarutung terkoneksi dengan sesar yang melalui Air Panas Panabungan di kedalaman. Hal tersebut juga didukung oleh hasil studi Muksin (2013).

Pull-apart basin secara umum merupakan suatu zona lemah yang memungkinkan zona di dalamnya memiliki suatu permeabilitas yang tinggi. Selain itu, Sesar Sumatera memiliki kedalaman yang sangat dalam, sehingga memungkinkan terjadinya transfer panas di kedalaman melalui zona permeabel yang ada di sepanjang bidang Sesar Sumatera.

Daerah panas bumi Sipoholon diinterpretasikan merupakan sistem panas bumi pada zona rekahan (*Fracture Zone System Hosted by Sedimentary Rocks*) berdasarkan Hochstein dan Browne, 2000 dan secara geologi, sumber panas dari sistem panas bumi Sipoholon diperkirakan berupa panas yang dihasilkan oleh suatu aktivitas tektonik (*heat sweep*), mengingat di daerah survei merupakan bagian dari segmen Sesar Sumatera yang masih aktif hingga saat ini. Namun tanpa menutup kemungkinan bahwa ada aktivitas magmatisme di bawah Sesar Sumatera yang tidak tampak di permukaan.

Reservoir panas bumi di daerah survei diduga terletak pada batulempung yang merupakan batuan alas di daerah

survei. Meskipun permeabilitas batulempung sangat kecil, akan tetapi dengan kehadiran permeabilitas sekunder berupa rekahan yang intensif sebagai akibat pengaruh dari aktivitas tektonik yang sangat intensif, menjadikan batulempung memiliki porositas dan permeabilitas yang sangat baik untuk menjadi *reservoir* panas bumi. Jalur permeabel di daerah survei sangat dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Sumatera dan hal tersebut didukung oleh hasil studi oleh Muksin, dkk. (2013), bahwa fluida panas untuk semua potensi panas bumi berasal dari bawah sesar.

berupa batulempung yang permeabilitasnya rendah.

Gabungan dari komponen sumber panas, reservoir, dan batuan penudung membentuk suatu sistem panas bumi di daerah Sipoholon, seperti yang tergambarakan melalui model geologi konseptual sistem panas bumi daerah Sipoholon (Gambar 12). Keberadaan struktur-struktur geologi, dalam hal ini adalah sesar, akan selain sebagai jalur permeabel fluida panas, juga sebagai pembatas sistem panas bumi di Sipoholon.

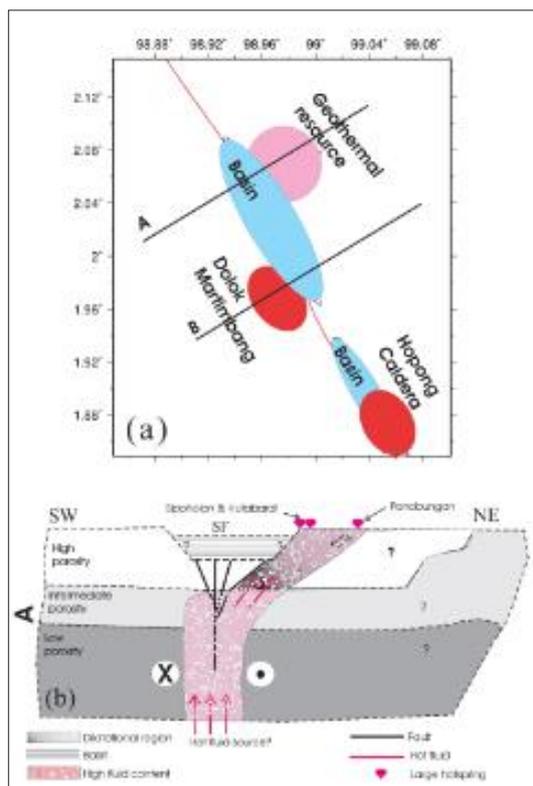
KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Daerah panas bumi Sipoholon berada pada morfologi datar hingga curam. Litologi yang menyusun daerah panas bumi Sipoholon adalah Satuan Batulempung Bohorok dan Satuan Granit Rura Julu sebagai batuan alas, Satuan Dasit Sitakka, Satuan Andesit Sandaran, Satuan Andesit Palangka Gading, Satuan Andesit Sibaragas, Satuan Andesit Sitarindak, Satuan Andesit Sipahutar, Satuan Andesit Imun yang tertutupi oleh Satuan Tuf Toba dan Aluvial.

Struktur geologi di daerah panas bumi Sipoholon dikontrol oleh hadirnya Sesar Sumatera. Sesar Sumatera juga menjadi pengontrol sistem panas bumi di Sipoholon.

Daerah panas bumi Sipoholon diidentifikasi berdasarkan kehadiran mata



Gambar 11. Model Aliran Fluida Panas (Muksin, dkk, 2013)

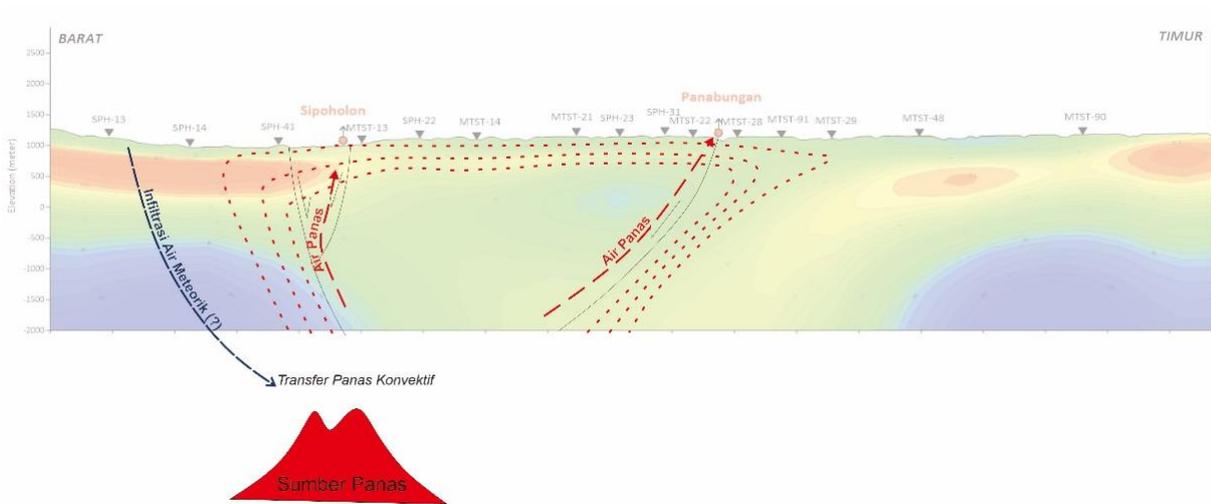
Batuan penudung (*cap rock*) dalam sistem panas bumi Sipoholon diperkirakan

air panas dengan temperatur 34,8-64,5°C. Daerah panas bumi Sipoholon termasuk sistem panas bumi non-vulkanik dengan transfer panas melalui mekanisme *heat sweep*.

Saran

Analisis data geologi menunjukkan bahwa daerah Sipoholon mempunyai

potensi sistem panas bumi yang menarik untuk diteliti lebih lanjut. Namun untuk mengetahui sistem panas buminya secara lebih akurat dan menyeluruh, terutama mengenai batas reservoir dan lapisan penudung serta wilayah prospeknya, diperlukan adanya integrasi dengan data geokimia dan geofisika.



Gambar 12. Model Tentatif Sistem Panas Bumi Sipoholon yang Ditumpangsusunkan dengan Penampang Resistivitas

DAFTAR PUSTAKA

Aldiss, D., Whandoyo, R., Ghazali, S., & Kusyono. (1983). Peta Geologi Lembar Sidikalang dan (Sebagian) Sinabang, Sumatra. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Chesner, C. A. (1998). Petrogenesis of the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia. *Journal of Petrology*, 397-438.

Corbett, C., & Leach, T. (1997). Short Course Manual: Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration, and Mineralization.

Harahap, B. (2007). Petrologi Batuan Magmatis Neogen Daerah Pangkalan Kotabaru Limapuluh Kota Sumatera Barat. *Jurnal Sumber Daya Geologi*.

- Hochstein, M. P., & Browne, P. R. (2000). Surface Manifestations of Geothermal with Volcanic Heat Sources. Dalam *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2017). *Peta Tata Guna Lahan*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Muhsin, U., Haberland, C., Bauer, K., & Weber, M. (2013). Three-Dimensional Upper Crustal Structure of The Geothermal System in Tarutung (North Sumatra, Indonesia) Revealed by Seismic Attenuation Tomography. *Geophysical Journal International*, 2037-2049.
- Nukman, M., & Hochstein, M. (2019). The Sipoholon Geothermal Field and Adjacent Geothermal Systems Along The North-Central Sumatra Fault Belt, Indonesia: Reviews on Geochemistry, Tectonics, and Natural Heat Loss. *Journal of Asian Earth Sciences*, 316-328.
- Nukman, M., & Moeck, I. (2013). Structural Controls on a Geothermal System in The Tarutung Basin, North Central Sumatra. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86-96.
- Putra, A. F., & Husein, S. (2016). Pull-Apart Basins of Sumatran Fault: Previous Works and Current Perspectives. *Proceedings Seminar Nasional Kebumihan Ke-9*.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2014 Tentang Panas Bumi*. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- Zuidam, R. A. (1983). *Guide to Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation and Mapping*.
- Zuidam, R. A. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*.

**SURVEI RINCI GEOLOGI, GEOKIMIA, GAYA BERAT DAN AUDIO MAGNETOTELLURIK
DAERAH PANAS BUMI MUARO PAITI, KABUPATEN LIMA PULUH KOTA,
PROVINSI SUMATERA BARAT**

Lano Adhitya Permana, Andri Eko Ari Wibowo dan Husin Setia Nugraha

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Indikasi keberadaan sistem panas bumi di daerah Muaro Paiti dicirikan oleh kehadiran mata air panas bertemperatur 34°C s.d 65°C. Secara geologi, daerah Muaro Paiti berada pada lingkungan cekungan sedimen dengan didominasi oleh kehadiran batuan berumur Miosen Awal hingga Miosen Tengah. Keberadaan struktur geologi yang terdapat di daerah Muaro Paiti, umumnya berarah baratlaut-tenggara dan utara – selatan dan diduga dapat berperan sebagai pengontrol kemunculan manifestasi panas bumi di daerah survei. Karakteristik mata air panas di daerah Muaro Paiti memiliki tipe bikarbonat, pH relatif basa, kaya akan unsur HCO₃ dan memiliki temperatur bawah permukaan hasil perhitungan geotermometer sebesar 110 s.d 150 °C. Hasil pemodelan gaya berat menunjukkan adanya kesamaan dengan model struktur geologi berupa adanya sinklin di daerah survei.

Sistem panas bumi daerah Muaro Paiti diperkirakan berkaitan dengan cekungan sedimen yang disertai adanya pengaruh *thermal gradient* dan kontrol struktur. Estimasi sumber daya energi panas bumi di daerah Muaro Paiti sebesar 2 Mwe pada kelas sumberdaya hipotetik yang dapat memberikan peluang untuk digunakan sebagai pemanfaatan langsung.

Kata kunci: muaro paiti, cekungan sedimen, mata air panas

PENDAHULUAN

Secara administratif, daerah Muaro Paiti berada dalam Kecamatan Kapur IX, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat. Secara geologi, daerah Muaro Paiti terletak pada Cekungan Sumatera Tengah yang merupakan cekungan belakang busur (*back arc basin*), dalam hal ini cekungan belakang busur terbentuk dari hasil proses penunjaman

lempeng samudera Hindia terhadap lempeng benua Eurasia pada kala Eosen – Oligosen sehingga memiliki bentuk struktur geologi yang cukup kompleks dan menarik untuk diteliti, terutama terkait keterdapatannya manifestasi panas bumi yang terletak di Cekungan Sumatera Tengah.

Kegiatan penyelidikan rinci di daerah Muaro Paiti dimaksudkan untuk memperoleh data geologi, geokimia, dan

data geofisika secara lebih rinci, terutama yang berkaitan dengan aspek kepanasbumian. Sedangkan, tujuan dari survei rinci ini yaitu untuk mengetahui karakteristik sistem panas bumi di daerah Muara Paiti berikut prospek dan rekomendasi kelayakan pengembangan pemanfaatannya.

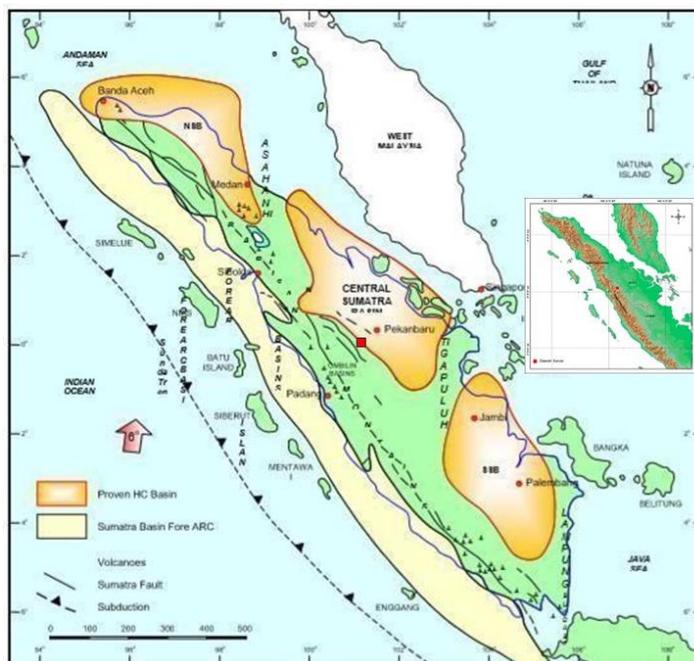
METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penyelidikan rinci di daerah Muaro Paiti berupa metode geologi, geokimia dan geofisika. Metode geologi digunakan untuk mengetahui sebaran batuan, struktur geologi dan karakteristik fisik manifestasi. Sedangkan, metode geokimia dilakukan untuk mengetahui karakteristik fluida. Sementara itu metode geofisika digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan beserta sebaran sifat fisika batuan.

GEOLOGI REGIONAL

Secara tektonik, Cekungan Sumatera Tengah terbentuk selama Tersier Awal (Eosen-Oligosen), sedangkan proses pengendapan sedimennya dimulai pada Eosen – Pliosen. Struktur geologi yang berkembang di wilayah ini yaitu terdiri dari dua pola sesar utama yang berarah utara - selatan dan barat laut – tenggara.

Cekungan Sumatera Tengah terletak berbatasan dengan Bukit Barisan pada bagian baratdaya, Busur Asahan pada bagian utara dan terdapat Tinggian Tigapuluh pada bagian selatan (Gambar 1). Cekungan ini memiliki tektonik aktif yang searah dengan Pulau Sumatera yaitu baratlaut. Di sepanjang singkapan yang berada pada cekungan ini memperlihatkan bentuk *strike-slip fault* (Hedrick dan Aulia, 1993).



Gambar 1. Batas Cekungan Sumatera Tengah (Hedrick dan Aulia, 1993)

HASIL ANALISIS

MANIFESTASI PANAS BUMI

Secara umum, kemunculan manifestasi mata air panas di daerah survei berada di sepanjang Sungai Kapur. Empat conto mata air panas diperoleh dari kelompok mata air panas Muaro Paiti, sedangkan dua conto air panas diperoleh dari kelompok mata air panas Lubuk Panjang. Sementara itu, terdapat masing-masing satu conto mata air panas yang berasal dari kelompok mata air panas Batu Bobok dan mata air panas Sumanio. Secara lengkap, keterdapatn sebaran manifestasi dan karakteristik mata air panas daerah survei dapat dilihat pada tabel 1.

GEOLOGI

Clarke M.C.G., dkk. (1982) menyebutkan bahwa hasil pemetaan geologi regional lembar Pekanbaru di daerah Muaro Paiti dan sekitarnya,

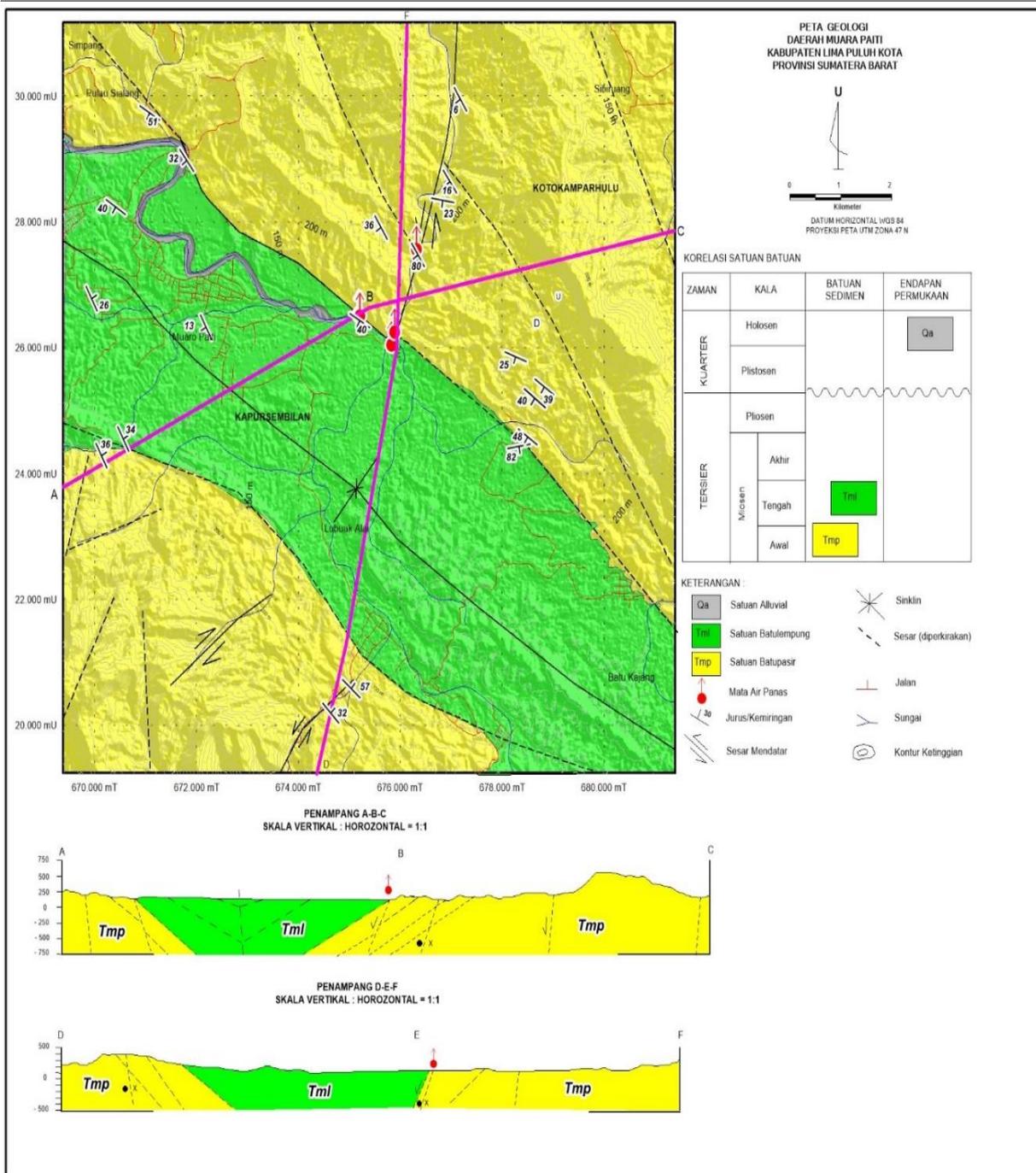
terdapat urutan stratigrafi dari tua ke muda, yaitu : Formasi Kuantan (Puku), Anggota Tanjungpauh (Pukt), Formasi Bohorok (Pub), Formasi Sihapas (Tms), Formasi Telisa (Tmt), Gunung Api Minor yang tak Teruraikan (QTV), dan alluvium muda (Qh). Sedangkan, hasil pemetaan geologi rinci yang telah dilakukan oleh Anonim, dkk (2023) menjelaskan bahwa di daerah survei hanya terdiri dari Satuan Batupasir yang tergolong dalam Formasi Sihapas yang berumur Miosen Awal, lalu terdapat Satuan Batulempung yang termasuk dalam Formasi Telisa yang berumur Miosen Awal-Miosen Tengah dan diperkirakan diendapkan pada lingkungan laut yaitu disekitar bagian neritik tengah - batial atas, serta terdapat Satuan Endapan Alluvial yang merupakan endapan sekunder hasil rombakan batuan di permukaan yang telah terbentuk sebelumnya.

Tabel 1. Manifestasi permukaan di daerah Muaro Paiti

NO	MANIFESTASI PANAS BUMI	KOORDINAT		ELEVASI (m)	SUHU AIR (°C)	DEBIT (lt/dtk)	pH	DHL (µS/cm)	KETERANGAN
		(mT)	(mS)						
1	AP Muaro Paiti 1	675175	26543	121	57.4	0.2	6.12	495	Air panas berasa besi, jemih, keluar dari rekahan batuan pasir di dinding sungai Sungai Kapur. Terdapat oksida besi di tempat keluarnya mata air panas.
2	AP Muaro Paiti 2	675200	26528	120	61.2	1	5.64	368	Air panas jemih, terdapat gelembung gas, terdapat sedikit lapisan minyak di permukaan, berada dipinggir Sungai Kapur, dimanfaatkan sebagai pengisi kolam.
3	AP Muaro Paiti 3	675205	26527	119	65.2	0.5	6.26	460	Air panas jemih, terdapat gelembung gas yang lebih banyak dan intens dibanding APMP 2, muncul di pinggir Sungai Kapur yang dimanfaatkan sebagai pengisi kolam pemandian. Terdapat oksida besi yang cukup tebal dan terdapat sedikit lapisan minyak di permukaan.
4	AP Muaro Paiti 4	675824	26065	115	39.9	0.1	6.28	66	Air panas sedikit keruh, berada di Timur Sungai Kapur, keluar dari pipa kecil yang tertampung dalam kolam.
5	AP Lubuk Panjang 1	675896	26286	122	49.9	0.1	6.57	173.8	Mata Air Panas keluar dari batuan pasir di sisi barat Tebing Sungai Kapur. Terdapat oksida besi yang cukup pekat.
6	AP Lubuk Panjang 2	676171	26726	125	42.8	0.2	6.66	231	Mata air panas keluar dari batuan pasir disisi barat tebing Sungai Kapur. Terdapat oksida besi, air jemih dan berasa besi.
7	AP Batu Bobok	678019	26391	121	34	0.05	6.02	81	Mata air panas keluar dari celah batuan pasir disisi timur Sungai Kapur. Terdapat oksida besi, air jemih dan berasa besi.
8	AP Sumanio	678310	27584	103	41,7	0,1	6,1	-	Manifestasi tidak dapat diambil karena terendam air pasang sungai. Data menggunakan hasil Survei Pendahuluan.

Hasil observasi lapangan pada daerah survei menunjukkan adanya struktur sesar dan lipatan yang relatif berarah utara baratlaut – selatan tenggara dan timurlaut – baratdaya dengan jenis struktur geologi berupa sesar mendatar

mengiri, sesar normal, lipatan sinklin dan sesar mendatar menganan. Secara ringkas, jenis sebaran batuan dan struktur geologi daerah survei dapat dilihat pada peta geologi (Gambar 2).

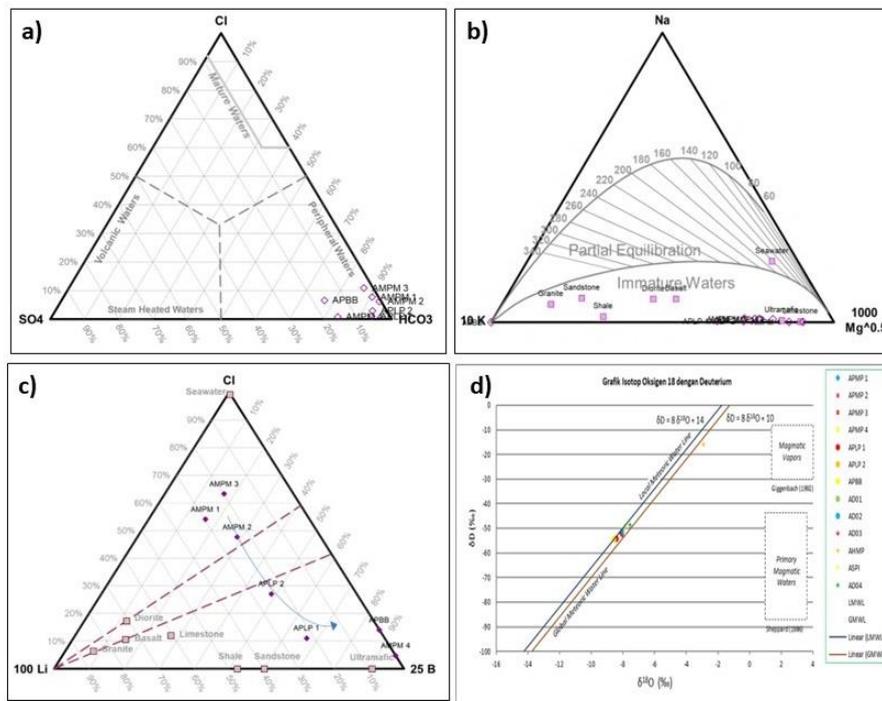


Gambar 2. Peta geologi daerah Muaro Paiti

GEOKIMIA

Karakteristik dan tipe air panas dapat diketahui dengan melakukan *plotting* komposisi kimia dari mata air panas pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃, Na-K-Mg, dan Cl-Li-B yang mengacu kepada Giggenbach (1988). Berdasarkan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 3.a) memperlihatkan bahwa seluruh contoh air panas daerah panas bumi Muaro Paiti bertipe bikarbonat dengan komposisi klorida yang rendah (<22 ppm). Plotting Na-K-Mg pada seluruh sampel air panas berada di zona *immature water* yang mengindikasikan pemunculan air panas sangat dipengaruhi oleh air meteorik (Gambar 3.b). Pada diagram segitiga Cl-Li-B fluida Muaro Paiti berada pada zona Cl yang mengarah ke zona B yang dapat

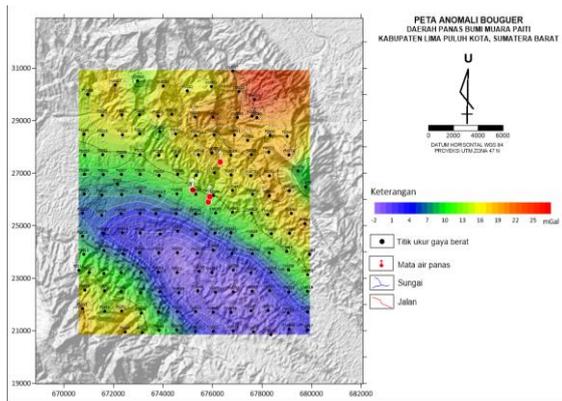
diasumsikan bahwa lingkungan pembentukan berupa lingkungan vulkanik yang dipengaruhi batuan sedimen (Gambar 3.c). Hasil diagram segitiga tersebut juga mengindikasikan semua mata air panas berasal dari reservoir yang sama. Sementara itu, berdasarkan hasil isotop ¹⁸O dan Deuterium yang diperoleh dari sampel mata air panas daerah Muaro Paiti dan dilakukan plotting ke dalam diagram hubungan antara Oksigen-18 dan Deuterium, terletak di dekat garis air meteorik (*meteoric water line*) (Gambar 3.d). Pergeseran yang tidak terlalu signifikan diasumsikan bahwa pengkayaan yang terjadi sedikit dan dapat diasumsikan bahwa fluida reservoir berada pada kedalaman yang dangkal ataupun temperatur yang tidak tinggi.



Gambar 3. a) Diagram Cl-SO₄-HCO₃; b) Diagram NA-K-Mg; c) Diagram Cl-Li-B; d) Diagram Isotop

GAYA BERAT

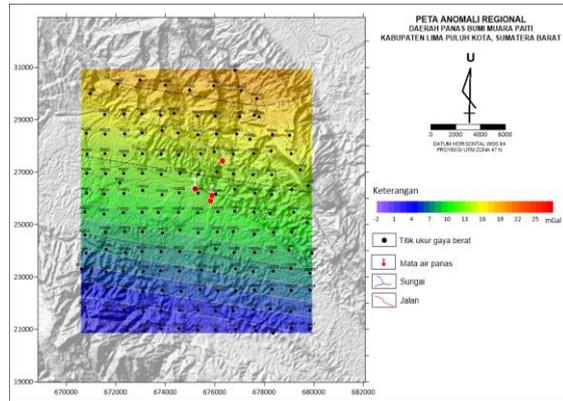
Secara umum, pola anomali pola anomali bouguer terkait erat dengan distribusi batuan penyusun daerah Muaro Paiti. Hal tersebut tampak sebaran anomali bouguer dengan nilai lebih besar dari 6 mgal memperlihatkan kecenderungan meninggi di timurlaut dan sedikit sebelah barat daya, pola ini kemungkinan merupakan respon dari batupasir. Sedangkan anomali rendah dengan nilai dibawah 6 mgal mengisi bagian tengah, dengan pola memanjang tenggara – baratlaut pola ini diperkirakan merupakan respon dari batulempung (Gambar 4).



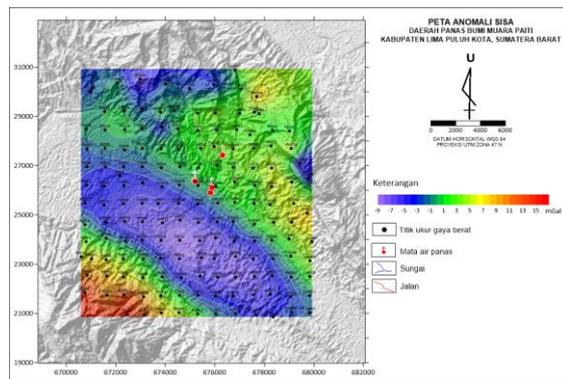
Gambar 4. Peta Anomali Bouguer

Anomali residual dan regional diperoleh dengan menggunakan metode filter polinomial orde 1. Anomali regional (Gambar 5) menunjukkan pola nilai yang tinggi di utara dan cenderung merendah ke selatan. Sedangkan, hasil anomali residual (Gambar 6) memperlihatkan pola yang sama dengan anomali bouguer dimana nilai densitas tinggi di sebelah timurlaut dan baratdaya. Sementara itu, anomali

rendah dengan nilai < -1 mgal berada di tengah daerah penyelidikan dengan pola memanjang baratlaut - tenggara pola ini diperkirakan merupakan respon dari batulempung.



Gambar 5. Peta Anomali Regional



Gambar 6. Peta Anomali Residual

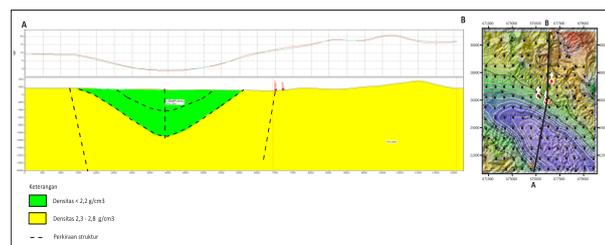
Hasil pemodelan 2,5D (Gambar 7) memperlihatkan adanya kesamaan dengan model dari geologi, dimana densitas rendah kurang dari $2,2 \text{ g/m}^3$ yang diperkirakan batulempung berada di bagian tengah membentuk cekungan berupa sinklin, sementara batupasir berada di bagian bawah dan mengisi bagian utara dan selatan dengan nilai densitas lebih dari $2,2 \text{ g/m}^3$. Mata Air Panas Muaro Paiti

berada pada sekitar densitas $2,7 \text{ g/m}^3$ yang juga terdapat struktur berdasarkan informasi geologi permukaan dan peta *First Horizontal Derivative*.

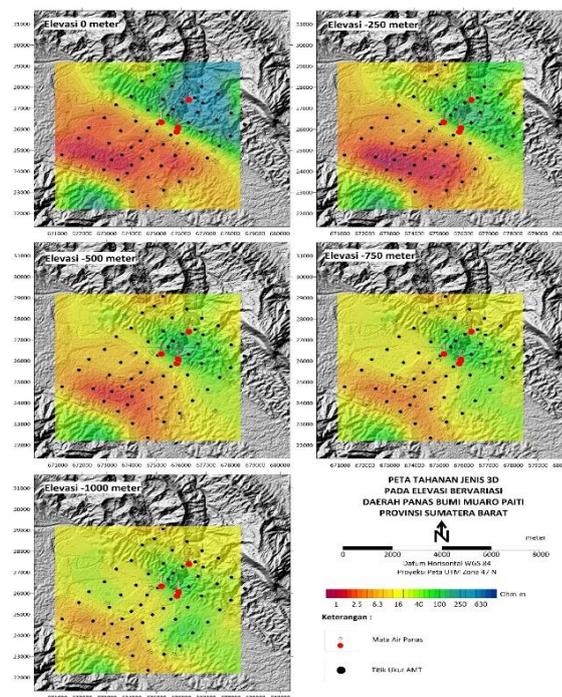
AUDIOMAGNETOTELLURIK

Hasil analisis audiomagnetotellurik menunjukkan adanya keberadaan lapisan bertahanan jenis rendah $<10 \text{ Ohm-m}$ dibagian tengah meluas ke arah baratdaya (Gambar 8) hingga kedalaman rata-rata sekitar 500 – 600 m (Gambar 4.4) diduga sebagai respon batulempung berumur

Miosen Awal yang merupakan bagian dari Formasi Telisa, atau dengan kata lain bukan merupakan respon dari lapisan penudung (*claycap*) dari sistem panas bumi tersebut. Proses tektonisme pada tepi basin Sumatera Tengah memaksa formasi batuan sedimen (batupasir) yang bersifat *ductile* untuk memendek secara horizontal dan memaksa batuan untuk menekuk menghasilkan struktur lipatan dan hasil dari deformasi struktur batupasir dan batulempung dalam kurun waktu sangat lama.



Gambar 7. Hasil Pemodelan 2,5D



Gambar 8. Peta tahanan jenis batuan pada elevasi yang bervariasi

PEMBAHASAN

Kondisi geologi daerah Muaro Paiti yang berada di Cekungan Sumatera Tengah menunjukkan bahwa daerah survei memiliki keterkaitan dengan pembentukan sistem panas bumi pada cekungan sedimen. Hal tersebut didukung oleh data audiomagnetotellurik yang menjelaskan bahwa keberadaan lapisan bertahanan jenis rendah <10 Ohm-m dibagian tengah meluas ke arah baratdaya hingga kedalaman rata-rata sekitar 500 – 600 m merupakan respon dari batuan sedimen, sehingga dapat dikatakan bahwa lapisan bertahanan jenis rendah bukan merupakan respon dari lapisan penudung (*claycap*) dari sistem panas bumi tersebut.

Grysen, dkk (2016) menyebutkan bahwa berdasarkan data temperatur yang berasal dari ratusan lubang sumur pengeboran di sekitar Cekungan Sumatera Tengah memperlihatkan bahwa terdapat aliran panas sebesar 77 mW.m^{-2} s.d 369 mW.m^{-2} dan *gradient thermal* sebesar 35° C/km hingga 191° C/km . Sedangkan, Eubank dan Makki (1981) menjelaskan bahwa tingginya *gradient geothermal* di Cekungan Sumatera Tengah disebabkan oleh adanya pergerakan kerak yang menembus ke mantel bagian atas. Hal tersebut dapat menguatkan bahwa keberadaan mata air panas di daerah Muara Paiti diperkirakan dipengaruhi oleh adanya *gradient thermal* dan aliran panas (*heat flow*) yang tinggi serta adanya kontrol struktur.

Sistem panas bumi pada cekungan sedimen dapat berasosiasi dengan sistem sirkulasi dalam (*deep circulation*), dimana fluida panas yang ada hanya sebagai bagian dari proses sirkulasi. Fluida panas pada sistem panas bumi daerah Muara Paiti merupakan fluida panas yang kaya akan unsur HCO_3 . Fluida panas tersebut bergerak menuju permukaan melalui media berupa zona patahan hingga akhirnya tiba di permukaan sebagai mata air panas. Selama perjalanannya menuju ke permukaan, fluida panas tersebut berinteraksi juga dengan batuan yang dilaluinya dan mengalami kontaminasi dengan air permukaan. Hal tersebut tampak dari tingginya kandungan HCO_3 dan Mg dalam air panasnya.

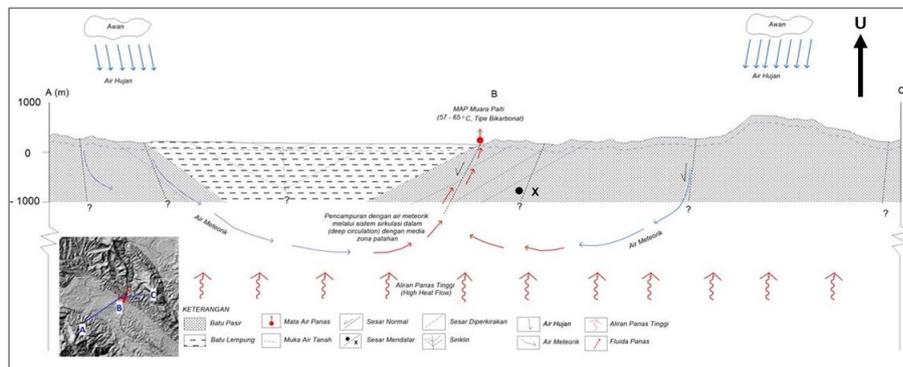
Temperatur bawah permukaan di daerah Muara Paiti berdasarkan perhitungan geotermometer K-Mg diperkirakan sekitar 110°C s.d 150°C yang dapat digolongkan kedalam temperatur rendah hingga menengah.

Berdasarkan hasil analisis integrasi data geosains yang telah dilakukan, maka dapat diindikasikan bahwa mata air panas Muara Paiti berhubungan dengan cekungan sedimen (Gambar 9). Pembentukan sistem panas bumi di cekungan sedimen berkaitan juga dengan sistem sirkulasi dalam (*extension-driven*) yang merupakan hasil dari sirkulasi dalam air meteorik di sepanjang zona sesar atau zona rekahan pada daerah yang memiliki *heat flow* yang tinggi (Anderson dan Lund,

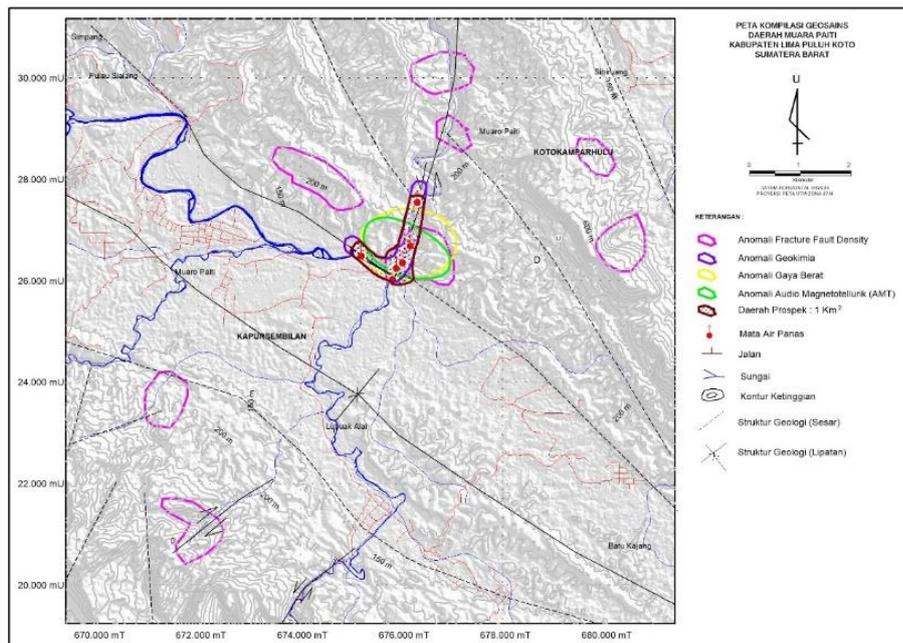
1979). Dalam hal ini, pembentukan sistem panas bumi daerah Muara Paiti berasosiasi dengan panas yang berasal dari peningkatan gradien panas yang sebanding dengan penambahan kedalaman dan berkaitan dengan aktivitas sesar yang dapat berperan sebagai media sirkulasi air meteorik.

Berdasarkan integrasi data geologi, geokimia dan geofisika, menunjukkan bahwa daerah survei memiliki daerah prospek disekitar perpotongan antar sesar

dengan luas sekitar 1 km² (Gambar 10), sedangkan estimasi sumberdaya panas bumi daerah Muaro Paiti berdasarkan metode volumetrik, diperoleh sumberdaya panas bumi sebesar 2 MWe pada kelas sumberdaya hipotetik. Peluang adanya daerah prospek panas bumi di daerah Muaro Paiti dapat digunakan sebagai pemanfaatan langsung, diantaranya pengelolaan kawasan wisata dalam bentuk pemandian air hangat/air panas, pengeringan gambir dan akuakultur.



Gambar 9. Konseptual model daerah Muara Paiti



Gambar 10. Peta kompilasi geosains daerah Muara Paiti

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kondisi geologi daerah Muara Paiti yang berada di Cekungan Sumatera Tengah menunjukkan bahwa daerah survei memiliki keterkaitan dengan pembentukan sistem panas bumi pada cekungan sedimen yang disertai adanya pengaruh *thermal gradient* dan kontrol struktur. Selain itu, pembentukan sistem panas bumi di cekungan sedimen diduga berkaitan juga dengan sistem sirkulasi dalam (*deep circulation*) yang merupakan hasil dari sirkulasi dalam air meteorik di sepanjang zona sesar atau zona rekahan pada daerah yang memiliki *heat flow* yang tinggi.

Sebaran daerah yang menarik (*interest area*) diperkirakan berada disekitar kompleks mata air panas Muara

Paiti, tepatnya di sekitar perpotongan antar sesar dengan luas areal sekitar 1 km², dengan estimasi sumberdaya panas bumi sebesar 2 MWe pada kelas sumberdaya hipotetik.

Keberadaan mata air panas di daerah survei dapat memberikan peluang untuk digunakan sebagai pemanfaatan langsung.

Saran

Diperlukan penyelidikan lebih lanjut dengan metode *Time Domain Electro Magnetic* (TDEM) ataupun geolistrik. Sedangkan, untuk mengetahui keberlangsungan keluarnya mata air panas, terkait debit yang dapat dipakai untuk pemandian ataupun pemanfaatan lainnya dapat digunakan uji pemompaan (*pumping test*).

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2023, "Survei Rinci Geologi, Geokimia, Gaya Berat dan Audiomagnetotellurik di Daerah Panas Bumi Lima Puluh Kota, Sumatera Barat", Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.
- Anderson, D. N., & Lund, J. W., 1979, Direct utilization of geothermal energy: a layman's guide. Geothermal. Resources Council special report No. 8
- Clarke, Kartawa, Bagdja.M, 1982, "Peta Geologi Lembar Pekanbaru, Sumatera Barat", Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan Republik Indonesia.
- Eubank, R. T. & Makki, A. C., 1981. Structural geology of the Central Sumatra Back-arc Basin. Jakarta, IPA.
- Grysen, T., Gibson, D. & Nicholson, K., 2016. Geothermal (heat flow) map of the Sumatra, Munchie: 50th Annual GSA North-Central Section Meeting.

- Giggenbach, W.F., 1988, "Geothermal Solute Equilibria Deviation of Na-K-Mg – Ca Geo-Indicators. *Geochemica Acta* 52. pp. 2749 – 2765".
- Heidrick, T. L., & Aulia, K, 1993, "A Structural and Tectonic Model of the Coastal Plains Block, Central Sumatra Basin, Indonesia".

SURVEI RINCI GEOLOGI DAERAH PANAS BUMI BORA-PULU, KABUPATEN SIGI, PROVINSI SULAWESI TENGAH

Sukaesih, Widya Asoka Suleman, dan Mochamad Nur Hadi

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Bora-Pulu terletak di Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah. Lokasi survei geologi tepat berada di jalur sesar Palu Koro. Data stratigrafi batuan, struktur geologi, dan mineral ubahan, digunakan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi Bora-Pulu termasuk penyebarannya, zona permeable yang terbentuk, dan zonasi mineral ubahan yang berkaitan dengan proses hidrotermal. Tahapan survei meliputi studi literatur, penyelidikan lapangan, dan pengolahan data hasil analisis laboratorium khususnya petrografi dan geokimia batuan.

Sistem panas bumi Daerah Bora-Pulu diindikasikan dengan munculnya manifestasi mata air panas bertemperatur 34°C hingga 95°C, tanah beruap dengan temperatur 99°C, batuan terubah dan tanah panas. Lingkungan geologi Bora-Pulu tersusun oleh batuan tua dengan jenis metamorfik Pra Tersier dan batuan intrusi berumur Tersier. Tumbukan antar mikro kontinen yang terjadi di Sulawesi bagian Tengah diduga menghasilkan proses magmatisme yang menghasilkan batuan magmatik muda sebagai salah satu sumber panas dalam sistem panas bumi Bora-Pulu.

Alterasi batuan hidrotermal berupa ubahan argilik lanjut, argilik hingga sub propilitik ditemukan di sekitar manifestasi tanah panas Bora, Mapane, Pulu, dan Saluki yang muncul di permukaan dan diduga sebagai lapisan batuan penudung (*cap rock*).

Aktifitas sesar Palu-Koro hingga saat ini berperan dalam membentuk kondisi permeabilitas yang tinggi, sehingga memiliki *heat flux* yang tinggi, didukung sistem hidrologi sebagai suplai daerah resapan pada daerah blok sesar dan lembah depresi Bora-Pulu.

Sistem panas bumi Bora-Pulu diperkirakan berasosiasi dengan sistem *heat sweep* pada zona sesar Palu-Koro yang berkaitan dengan aktifitas magmatisme muda disekitarnya.

Kata kunci: Bora-Pulu, sistem panas bumi, heat flux, heat sweep, Palu-Koro

PENDAHULUAN

Secara administratif daerah panas bumi Bora-Pulu termasuk dalam wilayah

Kabupaten Sigi, Propinsi Sulawesi Tengah, pada koordinat geografis antara 119° 49' 8" – 119° 59' 1" BT dan 0° 55' 16" LS - 1° 18'

46" LS. Daerah panas bumi Bora-Pulu terletak di sebelah selatan Kota Palu, ibukota Provinsi Sulawesi Tengah. Status tata guna lahan daerah panas bumi Bora-Pulu berdasarkan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2017 terbagi menjadi hutan lindung, hutan produksi terbatas, dan kawasan suaka alam.

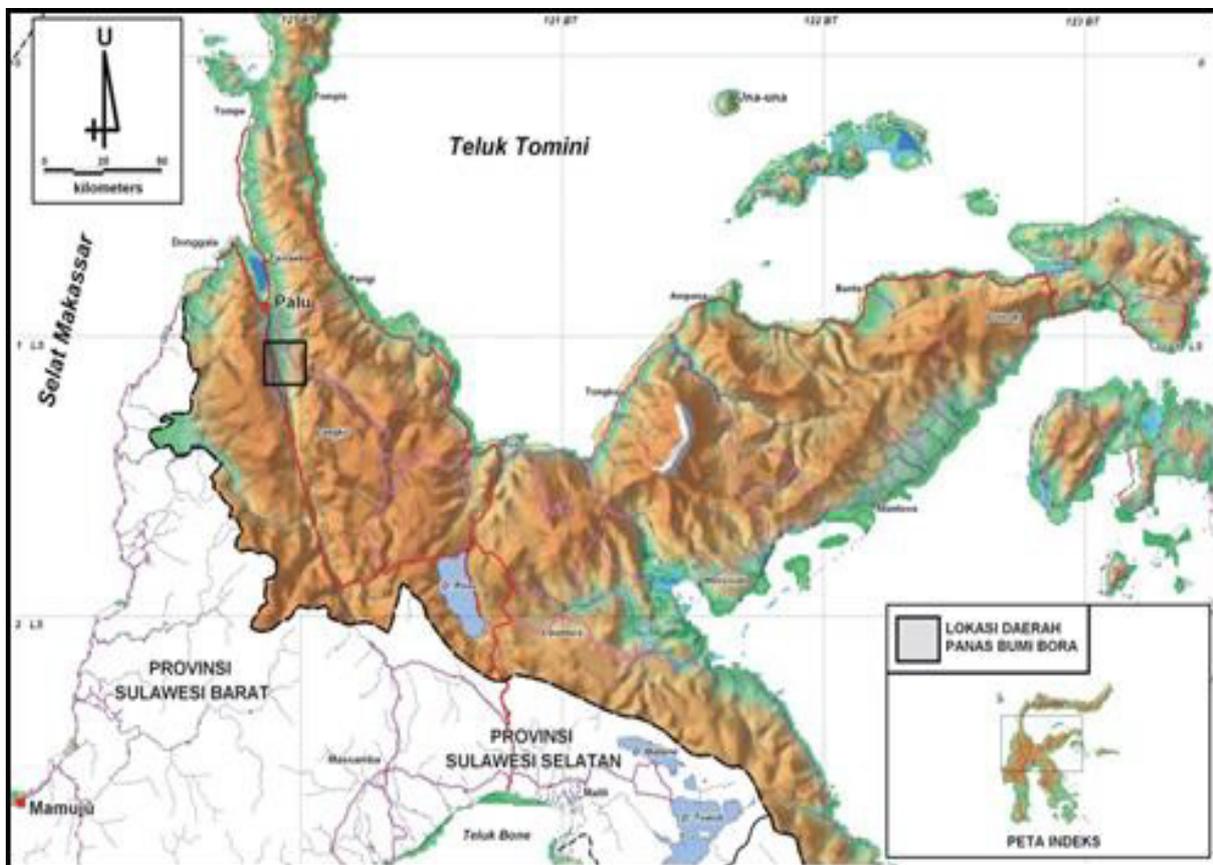
METODOLOGI

Tiga tahapan metode yang digunakan dalam pelaksanaan survei panas bumi yaitu studi literatur, penyelidikan lapangan dan pengolahan data serta analisis laboratorium. Studi literatur untuk mengumpulkan dan

menggabungkan data sekunder yang relevan dari hasil penyelidikan terdahulu dan dilakukan pengolahan data citra satelit dan *Digital Elevation Model* (DEM) untuk melokalisasi area fokus survei geologi.

Survei lapangan meliputi pemetaan, pengamatan batuan dan pengukuran struktur seperti rekahan, kekar, cermin sesar, offset, triangulasi, dan analisis data topografi. Pengambilan conto batuan yang representatif, mewakili satuan dan analisis di laboratorium.

Tahap pengolahan dan interpretasi hasil lapangan dan laboratorium untuk mendapatkan Gambaran sistem panas bumi dan model geologi daerah Bora-Pulu.



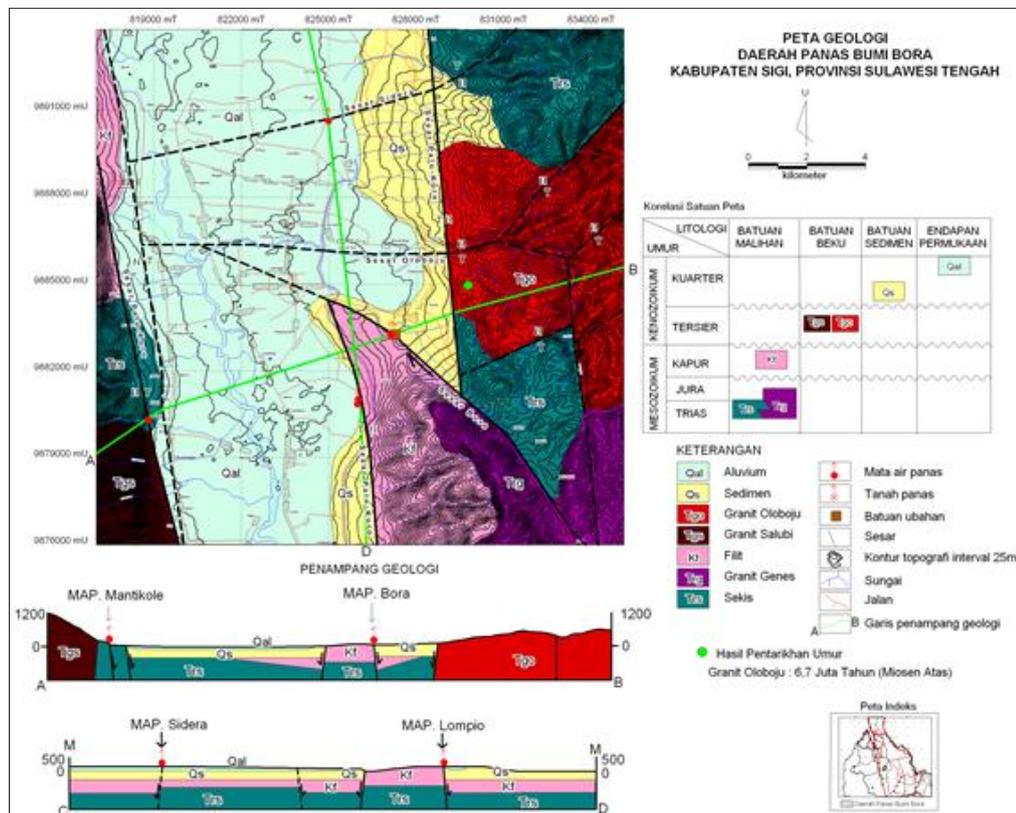
Gambar 1. Peta indeks lokasi daerah survei

GEOLOGI REGIONAL

Daerah Panas Bumi Bora-Pulu terletak pada sebelah utara dari Peta Geologi Lembar Pasangkayu, Sulawesi (Sukido, D. Sukarna dan K. Sutisna (1993) dan sebelah selatan Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Sumadirdja,H., dkk, 1973).

Pusat Sumber Daya Geologi melalui Survei Terpadu Geologi, Geokimia, Geofisika Daerah Panas Bumi Bora tahun 2010 menyebutkan terdapat tanah panas, mata air panas dengan temperatur sekitar 37°C - 100 °C dan batuan ubahan yang dapat dikelompokkan ke dalam tipe ubahan *argillic-advance argillic*. Stratigrafi daerah penyelidikan disusun oleh tujuh satuan batuan, yang terdiri tiga satuan batuan

malihan, dua satuan batuan terobosan, satu satuan batuan sedimen, dan satu endapan permukaan. Sumber panas diperkirakan berupa sisa panas dari dapur magma yang berasosiasi dengan aktivitas plutonik muda berumur Kuartar. Struktur geologi yang berkembang di daerah penyelidikan terdiri dari struktur sesar normal dan sesar obliq berarah relatif utara-selatan dan barat-timur yang mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi, dan sesar mendatar yang memotong dan mengakibatkan pergeseran pada batuan dan struktur yang sudah terbentuk sebelumnya. Kehilangan panas di permukaan (*heat loss*) di daerah Bora yaitu sekitar 834,86 kWth.



Gambar 2. Peta Geologi Bora Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah (PSDG, 2010)

HASIL PENYELIDIKAN DAN ANALISIS

Geomorfologi

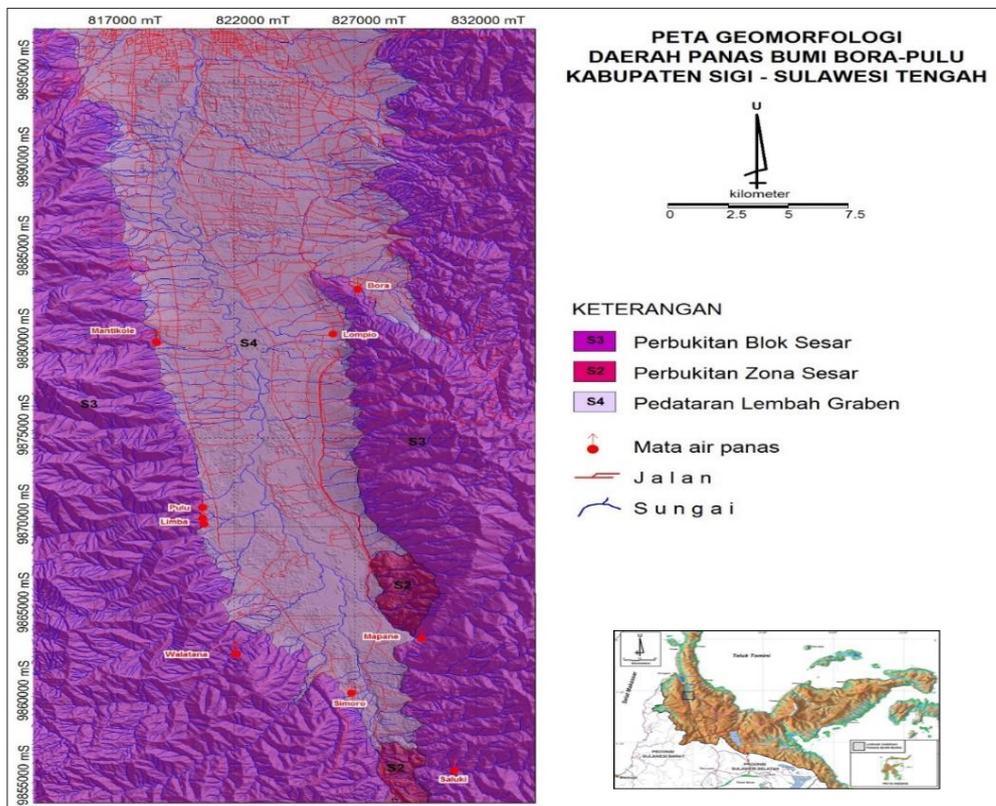
Daerah Panas Bumi Bora-Pulu yang berada pada zona Sesar Palu-Koro sangat dipengaruhi oleh fenomena geologi sesar aktif Palu-Koro tersebut yang bergerak secara mendatar-mengiri (sinistral).

Berdasarkan analisis geomorfologi, maka bentang alam daerah panas bumi Bora-Pulu terbagi menjadi 3 satuan geomorfologi, yaitu satuan geomorfologi perbukitan blok sesar (S.3), perbukitan zona sesar (S.2), dan satuan geomorfologi lembah graben (S.4).

Satuan geomorfologi perbukitan blok sesar (S.3) merupakan bagian

bentang alam pegunungan sesar, umumnya terdiri dari gawir sesar, gawir jalur sesar (*fault line scarp*), faset segitiga dan faset trapesoid. Berada pada elevasi 100 – 1400 (mdpl) dengan kemiringan lereng sekitar 20° - 71°. Litologi penyusun satuan ini terdiri dari sekis, granit, dan filit.

Satuan geomorfologi perbukitan zona sesar (S.2), berada di sekitar perpotongan sesar aktif Palu-Koro yang berarah relatif utara-selatan dengan sesar minor yang berarah relatif barat timur. dan timur zona depresi menjadi salah satu zona sesar berada pada elevasi 100 – 600 meter di atas permukaan laut (mdpl) dengan kemiringan lereng yang landai hingga curam, yaitu berkisar antara 12° - 23°.



Gambar 3. Peta geomorfologi daerah Panas Bumi Bora-Pulu

Satuan lembah graben (S.3) merupakan graben yang terbentuk pada jalur sesar Palu-Koro), banyak dijumpai mata air panas di kedua sisi dataran antara Palu – Kulawi tersusun oleh endapan aluvium.

Stratigrafi

Satuan litologi daerah Bora-Pulu dari tua ke muda terdiri dari satuan batuan Sekis (TRJs), Satuan Granit Genesan (TRJg), Satuan Filit (Kf), Satuan Granit Oloju (Tmga), Satuan Granit Salubi (Tmgs), Endapan Kolovium (Qk) dan Endapan Aluvium (Qa).

1. Satuan Sekis (TRJs)

Satuan batuan sekis tersingkap dengan baik dan sangat massif di sebelah timur dan sebagian di barat. Secara megaskopis batuan berlapis dan berfoliasi, berwarna kehijauan, setempat-setempat terdapat urat kuarsa dan urat kalsit. Secara mikroskopis, tampak struktur skistose, bertekstur lepidoblastik, tersusun oleh mineral kuarsa, klorit, kalsit, muskovit, mineral lempung dan opak. Kesebandingan dengan peta geologi regional (Sukido, dkk.,1993), bagian dari Formasi Wana berumur Trias dan diperkirakan merupakan batuan dasar di daerah survei.

2. Satuan Granit Genesan (TRJg)

Satuan Granit Genesan (TRJg) merupakan bagian dari tubuh intrusi

granitoid tersebar di bagian timur, telah berubah menjadi genesis. Secara megaskopis berwarna abu-abu terang kehitaman, bertekstur porfiritik sampai faneritik, tersingkap baik di sepanjang jalan menuju ke arah Palolo, banyak rekahan-kekar kolom yang diisi kuarsa, kalsit dan mineral pirit. Secara mikroskopis tampak relik holokristalin, tersusun oleh plagioklas, kuarsa, ortoklas, piroksen, hornblende, epidot, kalsit, klorit, dan opak. Jika dibandingkan dengan geologi regional lembar Pasangkayu (Sukido, dkk.,1993), granit genesan ini merupakan bagian dari Kompleks Gumbasa yang berumur Trias.

3. Satuan Filit (Kf)

Satuan filit (Kf), dijumpai di bagian baratdaya, secara megaskopis berwarna abu-abu kehitaman, sangat keras, berlapis sebagai bidang foliasi, berbutir halus, lanau sampai lempung dan setempat-setempat rekahan terisi oleh urat-urat kuarsa dan kalsit. Secara mikroskopis tampak struktur *microfold*, *tekstur lepidoblastik*, tersusun oleh mineral mikrokristalin kuarsa, hornblende, muskovit, kalsit, lempung, klorit, dan opak. Menurut kesebandingan dengan geologi regional Pasangkayu (Sukido, dkk.,1993) satuan ini merupakan bagian dari Formasi Latimojong yang berumur Kapur Atas, tidak selaras terhadap satuan sekis dan granit genesan.

4. Satuan Granit Olobuju (Tmgo)

Granit Olobuju (Tmga) tersingkap di daerah Olobuju, sebelah timur daerah survei, secara megaskopis berwarna putih kelabu, berbintik hitam, dengan komposisi mineral terdiri dari kuarsa, plagioklas, ortoklas serta mineral gelap lainnya (biotit, hornblende, amfibol), bertekstur porfiritik. Secara mikroskopis tekstur holokristalin, berukuran butir hingga 3 mm, bentuk Kristal subhedral hingga anhedral, tersusun oleh ortoklas, kuarsa, plagioklas, hornblenda, piroksen, klorit, dan opak. Dari hasil pentarikan umur (*dating*) Badan Geologi (2010) menggunakan metode jejak belah (*fission track*) menunjukkan bahwa umur satuan ini adalah $6,7 \pm 0,2$ juta tahun atau pada Kala Miosen Atas.

5. Satuan Granit Salubi (Tmgs)

Satuan granit Salubi (Tmgs) tersebar sangat luas di bagian barat daerah survei, secara megaskopis berwarna putih kelabu, berbintik hitam, tersusun mineral kuarsa, plagioklas, ortoklas serta mineral gelap lainnya (biotit, hornblende, amfibol). Secara mikroskopis tekstur holokristalin, bentuk kristal euhedral hingga subhedral, tersusun oleh mineral ortoklas, kuarsa, hornblenda, plagioklas, biotot, dan opak. Batuannya tertarik kuat oleh magnet Menurut kesebandingan dengan geologi regional Pasangkayu (Sukido, dkk.,1993) satuan Granit Salubi (Tmgs) merupakan bagian dari batuan

terobosan (Tm_{pi(g)}) yang berumur Miosen Tengah.

6. Endapan Koluvium (Qk)

Endapan koluvium (Qk) tersebar hampir di semua bagian kontak antara blok sesar dengan lembah graben, baik di sisi timur maupun sisi barat Berdasarkan kesetaraan stratigrafinya pada geologi regional Pasangkayu (Sukido, dkk.,1993), endapan koluvium ini dikelompokkan ke dalam Formasi Pakuli yang berumur Pleistosen.

7. Endapan Aluvium (Qa)

Endapan aluvium (Qa) merupakan endapan permukaan hasil rombakan batuan di permukaan yang telah terbentuk sebelumnya. Endapan terdiri dari material lepas berupa lempung, pasir dan bongkahan sekis, fillit, granit, andesit, dan diorit.

Struktur Geologi

Struktur geologi utama yang mengontrol daerah survei adalah sesar Palu-Koro yang merupakan sesar mendatar mengiri dengan tegasan utama relatif berarah utara – selatan.

Sesar Palu – Koro tersebut membentuk depresi menangga yang tersingkap pada bagian tengah daerah survei, membentang dari utara (Palu) hingga ke selatan (Bone). Kemudian struktur-struktur geologi yang berkembang pada daerah survei adalah sesar minor berupa sesar mendatar yang berorientasi timur laut - barat daya, barat - timur, dan

barat laut - tenggara. Sesar minor tersebut diinterpretasikan merupakan sesar sesar berumur tua yang mengalami re-aktivasi akibat *trigger* dari sesar Palu – Koro yang masih aktif hingga sekarang. Terdapat 12 struktur sesar, yaitu :

1. Sesar Bora (F1)

Berdasarkan hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus (*shear fracture*) yang berarah umum N114°E/81°SE dan N31°E/41°NE, kedudukan bidang sesar F1 adalah N305°E/85°NW, *Dip Slip* relatif menurun dengan nilai *pitch* sebesar 6°. Berdasarkan klasifikasi Rickard (1972) sesar ini termasuk *Left Slip Fault*.

2. Sesar Sidondo (F2),

hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum N157°E/79°SE dan N254°E/74°SW, kedudukan bidang sesar F2 adalah N285°E/80°NW, *strike slip* mengangan (dekstral) dan *dip slip* relatif menurun (normal) dengan nilai *pitch* sebesar 4°. Menurut klasifikasi Rickard (1972) sesar F2 ini termasuk ke dalam *Right Slip Fault*.

3. Sesar Sibowi (F3),

Berdasarkan hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum N60°E/74°NE dan N317°E/73°NW, bidang sesar F3 adalah N74°E/79°NW, *strike slip*

menganan (dekstral) dan *dip slip* relatif menurun (normal) dengan nilai *pitch* sebesar 3°.

4. Sesar Pakuli (F4),

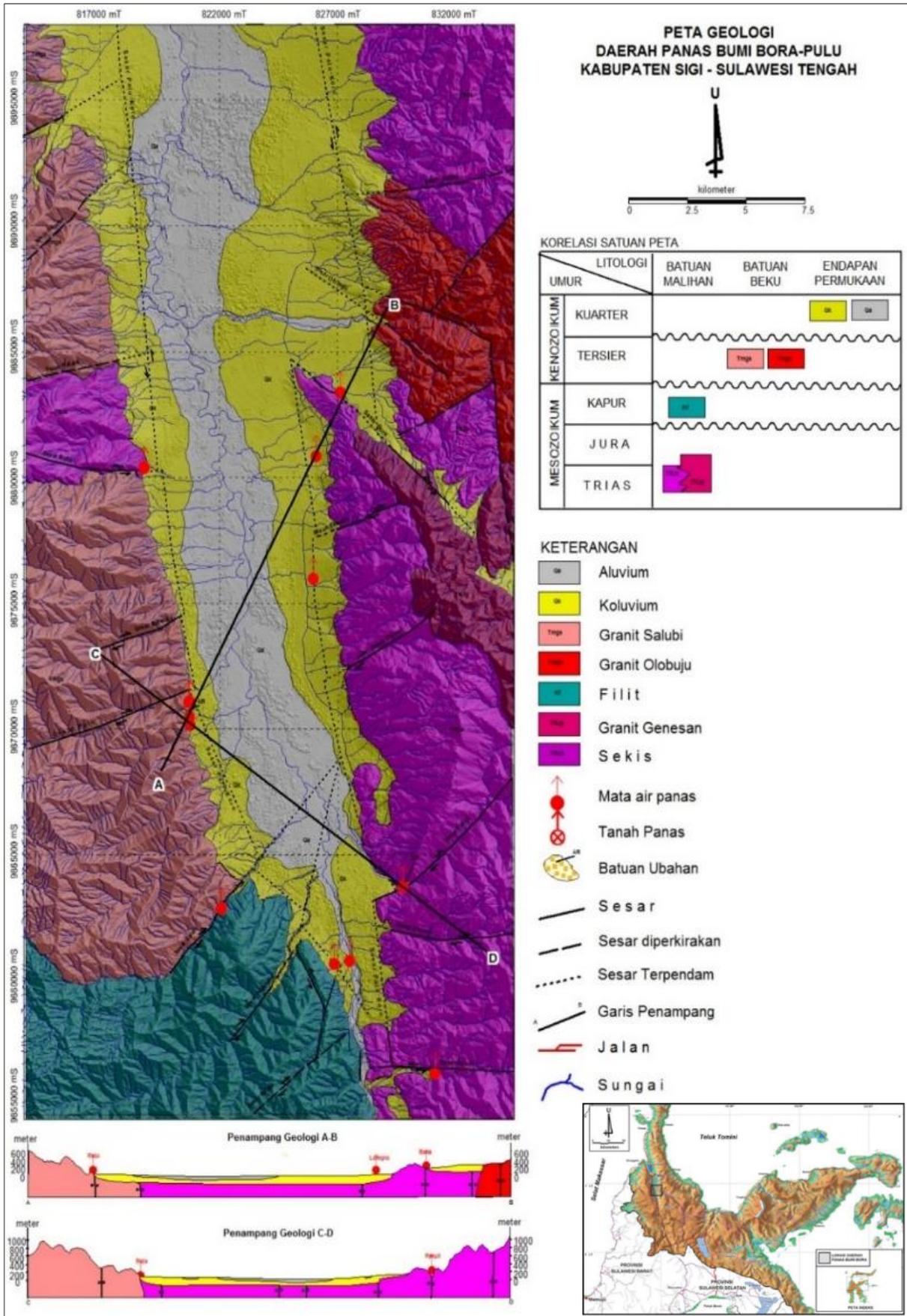
hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum N205°E/66°SW dan N122°E/31°NE, kedudukan bidang sesar F4 adalah N74°E/47°NE, *strike slip* mengangan (dekstral) dan *dip slip* relatif naik (*reverse*) dengan nilai *pitch* sebesar 34°. Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F4 ini termasuk ke dalam *Reverse Right Slip Fault*.

5. Sesar Simoro (F5),

Berdasarkan hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum N14°E/80°NE dan N323°E/76°NW, kedudukan bidang sesar F5 adalah N274°E/81°SW, *strike slip* mengangan (dekstral) dan *dip slip* relatif naik (normal) dengan nilai *pitch* sebesar 2°. Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F5 ini termasuk ke dalam *Right Slip Fault*.

6. Sesar Saluki (F6),

Hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus, kedudukan bidang sesar F6 adalah N311°E/15°SW, *strike slip* mengiri (sinistral) dengan nilai *pitch* sebesar 24°. Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F6 ini termasuk ke dalam *Lag Left Slip Fault*.



Gambar 4. Peta geologi daerah panas bumi Bora-Pulu, Kabupaten Sigi

7. Sesar Banga (F7),

Analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum $N35^{\circ}E/78^{\circ}NE$ dan $N128^{\circ}E/79^{\circ}SE$, kedudukan bidang sesar F7 adalah $N5^{\circ}E/83^{\circ}NE$, *strike slip* mengiri (sinistral) dan *dip slip* relatif turun (normal) dengan nilai *pitch* sebesar 3° . Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F7 dengan jenis *Left Slip Fault*.

8. Sesar Walatana (F8),

Hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum $N239^{\circ}E/66^{\circ}SW$ dan $N314^{\circ}E/81^{\circ}NE$, kedudukan bidang sesar F8 adalah $N225^{\circ}E/67^{\circ}SW$, *strike slip* menganan (dekstral) dan *dip slip* relatif naik dengan nilai *pitch* sebesar 4° . Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F8 ini termasuk ke dalam *Right Slip Fault*.

9. Sesar Saluri (F9),

Hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus, kedudukan bidang sesar F9 adalah $N235^{\circ}E/64^{\circ}NW$, *strike slip* menganan (dekstral) dengan nilai *pitch* sebesar 30° . Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F6 termasuk ke dalam *Reverse Right Slip Fault*.

10. Sesar Pulu (F10),

hasil analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum $N156^{\circ}E/79^{\circ}SE$ dan $N232^{\circ}E/77^{\circ}SW$. Kedudukan bidang sesar F10 adalah $N265^{\circ}E/83^{\circ}SE$, *strike slip* mengiri (sinistral), *dip slip* relatif turun (normal) dengan nilai *pitch* sebesar 2° . Menurut

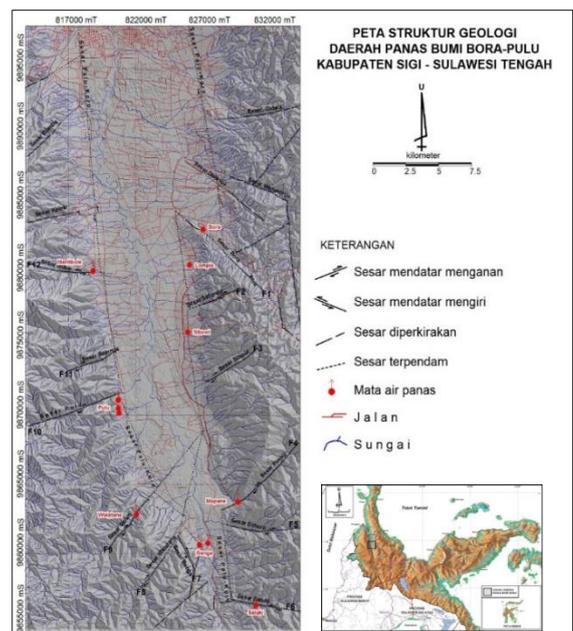
klasifikasi Rickard (1972), sesar F10 ini termasuk ke dalam *Left Slip Fault*.

11. Sesar Balonga (F11),

Analisis kinematikanya kekar gerus menunjukkan kedudukan bidang sesar F11 adalah $N265^{\circ}E/56^{\circ}$ dengan *pitch* 12° , *strike slip* menganan (dekstral), *dip slip* relatif normal. Menurut klasifikasi Rickard (1972), termasuk kedalam *Normal Right Slip Fault*.

12. Sesar Mantikole (F12).

Analisis kinematika sesar dari data kekar gerus yang berarah umum $N79^{\circ}E/77^{\circ}NE$ dan $N346^{\circ}E/77^{\circ}NW$, menunjukkan kedudukan bidang sesar F12 adalah $N94^{\circ}E/81^{\circ}SE$, *strike slip* kiri (sinistral), *dip slip* relatif naik dengan *pitch* 4° . Menurut klasifikasi Rickard (1972), sesar F12 ini termasuk ke dalam *Left Slip Fault*.



Gambar 5. Peta struktur geologi daerah Bora - Pulu

ALTERASI BATUAN

Batuan teralterasi di Daerah Panas Bumi Bora-Pulu berasosiasi dengan manifestasi panas bumi aktif saat ini seperti mata air panas dan tanah panas, dapat dilihat pada Gambar 6.

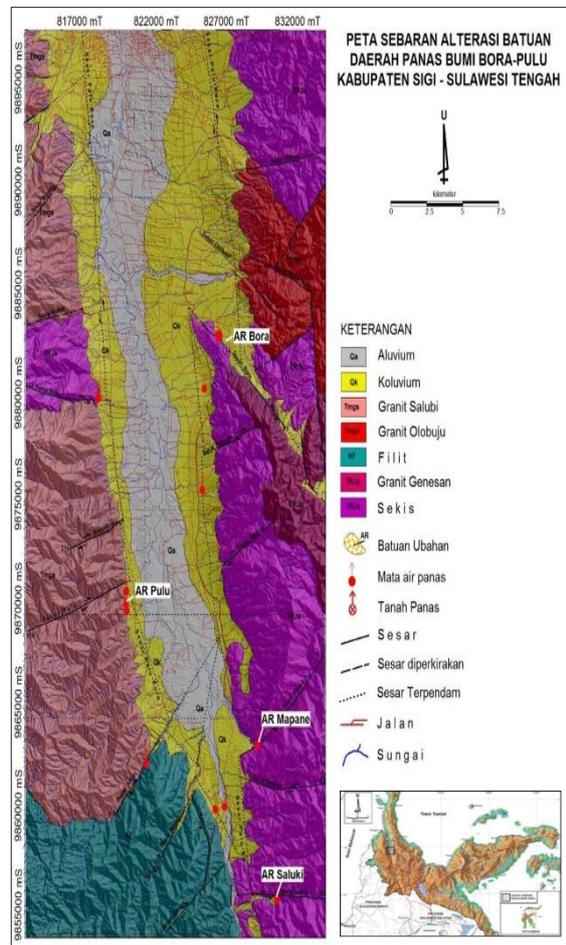
Alterasi Batuan di daerah Panas Bumi Bora-Pulu terdapat di 2 area berbeda, yaitu di area Bora, dan area Mapane (Pakuli).

1. Area Alterasi Bora

Hasil analisis *X-Ray Difraksi (XRD)* dari 5 conto batuan ubahan, terdeteksi mineral ubahan yang di daerah alterasi Bora tercantum dalam tabel 1.

Kehadiran mineral nontronit sebagai bagian dari grup illit-kalonit yang memiliki keberlimpahan unsur Fe merupakan mineral penciri dari ubahan tipe argilik di Bora. Pada ubahan tipe argilik terdapat dua kemungkinan himpunan mineral, yaitu muskovit – kaolinit – monmorilonit dan muskovit – klorit – monmorilonit. Himpunan mineral pada tipe argilik terbentuk pada temperatur 100°-300°C (Pirajno, 1992), fluida asam-netral, dan salinitas rendah. Kehadiran manifestasi berupa tanah panas di area Bora juga dilakukan analisis kesamaan temperaturnya (isothermal). Data yang digunakan dalam analisis tersebut berasal dari pengukuran temperatur tanah pada

kedalaman sekitar 1 meter. Variasi hasil pengukuran temperaturnya memperlihatkan nilai temperatur tertinggi sebesar 73,5°C dan terendah sebesar 33,5°C pada temperatur udara luar rata-rata sebesar 31°C. Hasil analisis statistiknya menunjukkan nilai rata-rata 45,3°C, nilai latar 52,9°C, dan standar deviasi sebesar 7,6 °C. Nilai anomali temperatur tinggi di atas 60,6°C hanya terdapat di titik BR-6, yaitu sebesar 73,5°C.



Gambar 6. Sebaran manifestasi batuan terubah di daerah panas bumi Bora-Pulu

Tabel 1. Hasil analisis mineral ubahan yang terdapat pada sampel batuan ubahan di area Bora

NO	KODE SAMPEL	LOKASI	ASOSIASI MINERAL		TIPE ALTERASI
			ANALISIS XRD	ANALISIS SPEKTRUM INFRA MERAH	
1	PL-124	Bora	<i>quartz, albite</i>	<i>allophane, nontronite, vermicullite, kaolinit-smectite, montmorillonite</i>	Argilik
2	PL-125	Bora	<i>quartz, illite</i>	<i>hematite, allophane, montmorillonite, nontronite, kalonite-smectite</i>	Argilik
3	PL-126	Bora	<i>quartz, gismondine</i>	<i>vermicullite, quartz, allophane, halite, nontronite</i>	Argilik
4	PL-127	Bora	<i>quartz, calcite, clinoferrosilite</i>	<i>hematite, allophane, montmorillonite, nontronite, kalonite-smectite</i>	Argilik
5	PL-128	Bora	<i>quartz, illite, nontronite, chlorite-serpentinite</i>	<i>allophane, montmorillonite, kaolinite-smectite, saponite, nontronite</i>	Argilik

2. Area Alterasi Mapane

Manifestasi panas bumi berupa batuan terubah di daerah Pakuli berada di sekitar mata air panas Mapane. Batuan ubahannya dijumpai pada manifestasi tanah panas Mapane dengan luas area sekitar 400 x 200 meter.

Kehadiran asosiasi mineral albit, heulandit, dan mineral halit (anhidrit) biasanya mencirikan alterasi bertipe sub propilitik. Bahkan mineral heulandit dan natronit umumnya hadir pada alterasi bertipe propilitik. Tanpa pengaruh kehadiran alunit, alterasi di Mapane kemungkinan terbentuk pada

temperatur 200°- 300°C pada pH relatif netral dengan salinitas beragam. Menurut Creasey (1966) terdapat kecenderungan asosiasi mineral yang hadir pada tipe propilitik berupa klorit-kalsit-kaolinit, klorit-kalsit-talk, klorit-epidot-kalsit, dan klorit-epidot.

Hasil analisis dan interpretasi terhadap asosiasi mineral ubahannya menunjukkan bahwa batuan telah mengalami ubahan hidrotermal menjadi kelompok mineral lempung kaolinit dan grup illit-kaolinit, sehingga dapat dikelompokkan ke dalam tipe ubahan argilik (*argillic*).

Tabel 2 Hasil analisis mineral ubahan pada sampel batuan ubahan di area Mapane

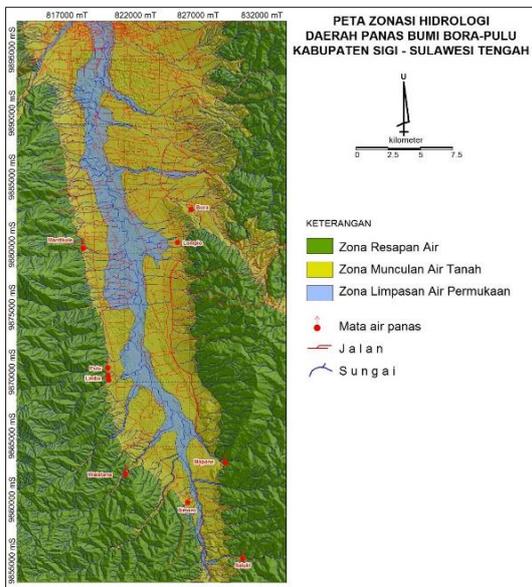
NO	KODE SAMPEL	LOKASI	ASOSIASI MINERAL		TIPE ALTERASI
			ANALISIS XRD	ANALISIS SPEKTRUM INFRA MERAH	
1	ALT-1	Mapane	-	halite, erionite, quartz, heulandite.	Sub-propilitik
2	ALT-2	Mapane	quartz, phillipsite, muscovite.	kaolinite-smectite, nontronite, laumontite, monmorillonite.	Sub-propilitik
3	ALT-3	Mapane	albite, quartz.	erionite, halite, heulandite, quartz, monmorillonite	Sub-propilitik
4	ALT-4	Mapane	quartz, illite.	laumontite, mordenite, monmorillonite, illite-smectite.	Sub-propilitik
5	ALT-5	Mapane	quartz, muscovite.	heulandite, halite, erionite, quartz, montmorillonite.	Sub-propilitik
6	ALT-6	Mapane	quartz, muscovite.	laumontite, mordenite, nontronite, montmorillonite, kaolinite-smectite.	Sub-propilitik
7	ALT-7	Mapane	mascagnite, cesium lead bromide,	alunite, sphalerite, tobelite, illite.	Argilik Lanjut
8	ALT-9	Mapane	quartz, calcite, chlorite-serpentinite	vermiculite, montmorillonite, kaonitite-smectite, quartz	Sub-propilitik

Tabel 3. Kisaran temperatur pembentukan beberapa mineral ubahan yang terdapat pada sampel batuan ubahan di area Bora

NAMA MINERAL	KISARAN TEMPERATUR PEMBENTUKAN (°c)					
	100	150	200	250	300	
Quartz	—					
Illite			-----			
Albite		-----				
Montmorillonite	-----					
Chlorite	-----					
Kaolinite-Smectite	-----					
Calcite	-----					
Nontronite	-----					
Halite	-----					
Vermiculite	-----					

HIDROGEOLOGI

Pola hidrologi di daerah Panas Bumi Bora-Pulu secara umum dipengaruhi oleh besarnya infiltrasi air meteorik ke dalam akuifer air tanah maupun reservoir panas bumi. Dengan curah hujan yang tinggi mencapai 268 mm³ di daerah survei, maka potensi infiltrasi air hujan atau air meteorik ke dalam bumipun semakin besar. Air meteorik inilah sebagai pensuplai utama akuifer air tanah maupun reservoir panas bumi.



Gambar 7. Peta zona hidrologi

MANIFESTASI PANAS BUMI

Manifestasi panas bumi di daerah penyelidikan berupa mata air panas yang penyebarannya sepanjang sisi barat dan timur struktur sesar Palu-Koro. Selain munculnya mata air panas, terdapat juga manifestasi berupa batuan terubah, tanah panas dan tanah beruap (*steaming ground*). Tanah beruap Bora memiliki

temperatur uap 93,62 °C pada temperatur udara 32 °C, sedangkan di Mapane temperatur uapnya 99,39 °C pada temperatur udara 35,61 °C.

PEMBAHASAN

Suatu sistem panas bumi konvensional setidaknya memiliki 4 unsur pembentuk, yaitu sumber panas, reservoir, lapisan penudung, dan fluida panas bumi.

Sumber Panas

Sumber panas di daerah prospek Bora-Pulu berdasarkan kajian geologi sangat erat kaitannya dengan tatanan tektonik regional sesar aktif Palu-Koro yang melewati daerah Bora-Pulu, sesar dengan arah pergerakan sinistral ekstensional yang mengakibatkan terjadinya penipisan kerak, sehingga akan dihasilkan *heat flux* dari peristiwa *mantle decompression*. Sesar Palu-Koro diinterpretasikan sebagai sesar yang kemenerusan bidangnya cukup dalam hingga memotong kerak (*crustal scale faults*) yang menyebabkan naiknya panas ke area yang lebih dangkal.

Reservoir

Kelompok manifestasi yang muncul di permukaan dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar muda yang berarah umum barat-timur. Perpotongan antara sesar muda dengan sesar utama Palu-Koro diduga meningkatkan permeabilitas pada area tersebut, sehingga memberikan

peluang untuk mengalirnya fluida panas hingga ke permukaan sebagai mata air panas. Selain berkaitan dengan sesar, zona permeabilitas tinggi juga diperkirakan merupakan reservoir berupa batuan metamorf (sekis & filit) yang terkekarkan secara intensif. Beberapa kegiatan tektonik intensif secara regional telah menjadikan terbentuknya bidang-bidang foliasi pada batuan metamorf tersebut, bahkan membentuk sistem kekar atau rekahan yang intensif pada batuan tersebut. Kehadiran manifestasi panas bumi berupa tanah panas dan tanah beruap di lokasi mata air panas Bora dan Mapane, maka diperkirakan bahwa reservoir panas bumi Bora dan Mapane berada di bawah atau tidak jauh dari manifestasi panas buminya. Hal ini semakin mendukung dugaan bahwa secara umum kehadiran manifestasi panas bumi permukaan di Boro-Pulu berkaitan dengan fluida panas di bawahnya. Sistem panas bumi di Bora-pulu kemungkinan setempat-setempat dengan kontrol sesar yang kuat sebagai penyebaran atau aliran fluida panasnya.

Batuan Penudung

Interaksi antara fluida panas yang terakumulasi di reservoir dengan batuan di atasnya (sekitarnya) menghasilkan batuan berubah atau alterasi hidrotermal yang banyak mengandung mineral alterasi hidrotermal. Lapisan ini secara fisika merupakan batuan yang memiliki nilai

resistivitas rendah atau bersifat konduktif. Batuan penudung inilah yang menyebabkan pergerakan fluida panas yang terdapat di lapisan reservoir tertahan untuk sampai ke permukaan. Alterasi hidrotermal di area Bora Pulu ini didominasi oleh mineral silika, sedangkan proporsi kehadiran mineral lempungnya tidak signifikan. Jika dikompilasikan dengan hasil analisis mineral ubahannya yang berupa argilik hingga sub-propilitik, maka fluida hidrotermal relatif netral hingga sedikit asam lemah dengan kemungkinan temperatur maksimum 200 °C.

Hubungan Litologi Terhadap Fluida

Panas Bumi

Berdasarkan pendekatan interpretasi dari hasil analisis kimia terhadap unsur Na, Cl, B, dan tipe fluida dapat diduga bahwa reservoir pada sistem panas bumi di Bora-Pulu berasosiasi dengan batuan yang bersifat karbonatan. Pada lokasi lain yang memiliki temperatur fluida panas bumi lebih tinggi, diikuti juga dengan peningkatan konsentrasi silika. Hubungan pengaruh litologi bersusunan karbonatan dan kaya silika terhadap fluida panas bumi, diperkirakan terwakili oleh sekis atau filit bagian dari Formasi Latimojong. Hal ini bersesuaian dengan pernyataan White dkk. (2017) bahwa Formasi Latimojong berasal dari perselingan batuan silisiklastik, karbonatan, dan vulkanik. Model

konseptual geologi sistem panas bumi Bora-Pulu dapat dilihat pada Gambar 8.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Daerah panas bumi Bora-Pulu erat kaitannya dengan kontrol sesar Palu-Koro dan sesar sekundernya yang memotong sesar utama yang masih aktif hingga sekarang. Kehadiran zona perpotongan antara struktur utama sesar Palu-Koro dengan struktur sekundernya mengakibatkan berkembangnya zona permeabilitas tinggi pada daerah tersebut. Meskipun litologi penyusunnya dominan relatif tua, yaitu berupa batuan metamorfik Pre Tersier dan batuan intrusi tua berumur Tersier, namun kemungkinan panas yang bekerja pada sistem panas bumi terlihat cukup tinggi, meskipun tidak seragam untuk semua lokasi dan jenis manifestasinya. Hal tersebut terindikasi dari manifestasi panas buminya yang memiliki karakteristik temperatur cukup tinggi, yaitu pada manifestasi Bora, Mapane, dan Pulu.

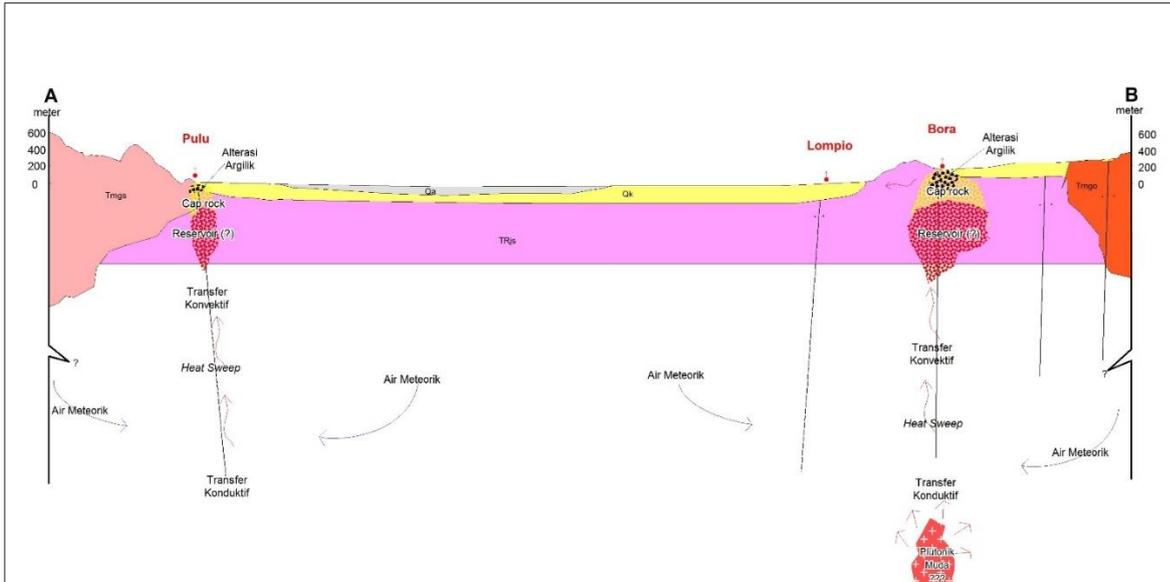
Interaksi antara fluida panas yang terakumulasi di reservoir dengan batuan di atasnya menghasilkan batuan terubah atau alterasi hidrotermal yang banyak mengandung mineral alterasi hidrotermal, mulai ubahan argili lanjut, argilik hingga sub

propilitik. Batuan alterasi hidrotermal berupa lapisan mineral lempung adalah bagian dari lapisan batuan penudung (*cap rock*) dari sistem panas bumi di bawahnya.

Sistem panas bumi Bora-Pulu berasosiasi dengan sistem *heat sweep* pada zona sesar yang sangat dalam, sangat aktif, dan memiliki anomali gradien panas yang lebih tinggi. Pengaruh zona struktur aktif (tektonik aktif) di daerah Bora-Pulu juga memberikan peluang besar untuk terjadinya magmatisme, seperti banyak terdapat retas-retas batuan plutonik andesit hingga diorit berumur Plistosen di beberapa lokasi di Sulawesi Tengah. Diperkirakan batuan magmatik muda tersebut sebagai salah satu faktor sumber panas dalam sistem panas bumi Bora-Pulu.

Saran

Untuk mendapatkan informasi yang lebih detail mengenai sistem panas bumi Bora-Pulu, hasil analisis dan interpretasi geologi perlu diintegrasikan dengan data atau informasi geokimia dan geofisika. Pemodelan geokimia dan geofisika sistem panas bumi dapat memberikan gambaran sistem panas bumi yang lebih akurat dan menghasilkan nilai angka parameter yang lebih akurat dalam pendugaan potensi energi panas buminya.



Gambar 8. Model konseptual geologi sistem panas bumi berarah barat daya – timur laut memotong air panas Bora-Lompio-Pulu

DAFTAR PUSTAKA

- Bemmelen, van R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. I A. The Hague. Netherlands.
- Creasey, S.C. 1966. *Hydrothermal Alteration, in Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America* (eds S.R. Tittley and C.L. Hicks).
- Hamilton, W., 1979. *Tectonic of Indonesia Region*, Geol. Surv. Prof. Papers, U.S. Govt. Print Off., Washington.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2017). Peta Tata Guna Lahan. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kenneth Wohletz Grant Heiken. 1992. *Volcanology and Geothermal Energy*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles. Oxford.
- M., Arif dkk, 2009. Laporan Uji Petik dalam rangka *“Joint Study on Non Volcanic Hosted Geothermal System in Central Part of Sulawesi”*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Ma, J. & Zhou, Z., 2021. *Origin of the low-medium temperature hot springs around Nanjing, China: Open Geosciences, 13(1), 820-834.* <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0269>
- Morrison, K. 1997. Important Hydrothermal Minerals and Their Significance. New Zealand: Geothermal and Mineral Service Division.
- Pirajno, F. 1992. *Hydrothermal Mineral Deposits Principal and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Springer-Verlag, Berlin.

- Simanjuntak, T. O., Surono dan Supandjono, J. B., 1997, "Peta Geologi Lembar Poso, Sulawesi, Skala 1:250.000", Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Sukido, Sukarna, D. dan Sutisna, K., 1993, "Peta Geologi Lembar Pasangkayu, Sulawesi Skala 1:250.000", Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Sumadirdja, H., Suptandar, T., Hardjoprawiro, S. dan Sudana, D., 1973. "Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi, Skala 1:250.000", Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Tim Survei, 2010, Survei Panas Bumi Terpadu Geologi Dan Geokimia Daerah Bora, Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah
- Pirajno, F. (1992) Hydrothermal Mineral Deposits Principal and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist. Springer-Verlag, Berlin.
- Welch, A. H., & Preissler, A. M. 1986. *Aqueous geochemistry of the Bradys Hot Springs geothermal area, Churchill County, Nevada*. Selected Papers in the Hydrologic Sciences. USGS Water-Supply Paper, 2290, 17-36.
- White, Lloyd., Hall, Robert., Armstrong, Richard., Barber, Anthony., BouDagher-Fadel, Marcelle., Baxter, Alan., Wakita, Koji., Manning, Christina dan Soesilo, Joko. 2017. *The geological history of the Latimojong region of western Sulawesi*. Journal of Asian Earth Sciences. 138. 10.1016/j.jseaes.2017.02.005.

SURVEI RINCI GEOKIMIA DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON RIA RIA KABUPATEN TAPANULI UTARA, PROVINSI SUMATERA UTARA

Dede Iim Setiawan, Winda Nirmala, dan Hamdi Anwar

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Keberadaan sistem panas bumi Sipoholon ditandai oleh kehadiran mata air panas kelompok Sipoholon (kelompok 1) dan Sibaragas (kelompok 2) dengan temperatur 35°C hingga 64°C. Kontrol Sesar Sumatera mengakibatkan kelompok air panas 1 yang berada tepat pada sesar permeabelnya memiliki endapan sinter travertin sangat tebal, bertemperatur lebih tinggi, pH netral, dan memiliki debit yang lebih besar, serta mengeluarkan buangan gas bertekanan relatif tinggi dengan sedikit terdeteksi gas H₂S. Kelompok air panas 2 yang berada di luar area sesar permeabelnya memiliki endapan oksida besi, bertemperatur lebih rendah, pH netral hingga sedikit agak asam dan debit yang lebih kecil, serta jarang mengeluarkan buangan gas.

Fluida panas bumi dari reservoir sistem panas bumi Sipoholon yang diperkirakan paling rendah bertemperatur 117°C - 183°C, dalam perjalanannya melepaskan gas saat mengalami *boiling* akibat perbedaan tekanan, berkaitan dengan migrasi fluida (*steam*) dari reservoir yang dalam. Senyawa bikarbonatnya yang berasal dari proses pelarutan mineral karbonat batuan kemudian secara perlahan terendapkan kembali menjadi sinter karbonat atau travertin di permukaan pada kondisi temperatur yang lebih rendah di kelompok 1. Sedangkan kelompok 2 diduga merupakan hasil kondensasi fluida panas (*steam*) yang bermigrasi dari kedalaman terhadap air permukaan dan menghasilkan endapan oksida besi di permukaan. Peristiwa di dekat permukaan tersebut diikuti juga oleh konversi HCO₃ menjadi CO₂, sehingga konsentrasi gas karbondioksida menjadi lebih tinggi. Gas karbondioksida yang dominan diikuti konsentrasi Ar yang tinggi memperkuat indikasi fluida panas yang berasosiasi dengan gas atmosferik atau air meteorik.

Pendekatan identifikasi area prospek panas bumi Sipoholon berdasarkan hasil analisis tanah dan udara tanah berasosiasi dengan zona anomali temperatur dan gas karbondioksida tinggi di sekitar manifestasi panas bumi.

Kata kunci: panas bumi, Sipoholon, travertin, Sesar Sumatera

PENDAHULUAN

Sipoholon merupakan salah satu daerah prospek panas bumi yang memiliki data geosain dengan kualitas baik dan memiliki sumber daya panas bumi yang menarik berdasarkan data hasil survei Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi sebelumnya. Kajian data geosainsnya menunjukkan bahwa daerah ini memiliki sumber daya panas bumi yang layak untuk dikembangkan.

Untuk menambah tingkat keyakinan data geosains yang akan digunakan dalam kegiatan eksplorasi selanjutnya seperti halnya pengeboran eksplorasi, pada tahun anggaran 2023 Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi melakukan kegiatan survei rinci dan akuisisi data geokimia di daerah tersebut. Kegiatan eksplorasi lanjutan tersebut diharapkan dapat memberikan informasi sistem panas bumi yang lebih detil dengan tingkat keyakinan yang lebih tinggi.

Maksud dari survei geokimia ini adalah untuk mendapatkan informasi mengenai sifat fisik dan kimia manifestasi panas bumi, serta distribusi temperatur udara tanah, pH tanah, konsentrasi Hg tanah, dan konsentrasi CO₂ udara tanah. Survei ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fluida, estimasi temperatur bawah permukaan (reservoir) dan mengetahui zona permeabilitas pada sistem panas bumi Sipoholon Ria Ria.

Lingkup kegiatan dalam survei rinci geokimia daerah panas bumi Sipoholon

meliputi pengamatan dan pengukuran sifat fisik dan kimia manifestasi panas bumi, analisis kimia fluida panas bumi, serta analisis temperatur udara tanah, pH tanah, konsentrasi merkuri (Hg) tanah dan analisis konsentrasi gas karbondioksida (CO₂) udara tanah di sekitar daerah prospek panas bumi Sipoholon.

Kegiatan survei difokuskan di sekitar daerah prospek panas bumi Sipoholon Ria Ria berdasarkan hasil evaluasi data geosains sebelumnya. Secara administratif daerahnya termasuk ke dalam Wilayah Kecamatan Tarutung, Siatas Barita, Parmonangan, Pagaran, Siborongborong, Sipoholon, dan Kecamatan Sipahutar, Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera Utara. Secara geografis berada pada 1° 56' 00" - 2° 06' 00" LU dan 98° 54' 00" - 99° 01' 30" BT atau 215.600 mU - 232.100 mU dan 488.000 mT - 504.000 mT pada sistem koordinat UTM Zona 47, belahan bumi utara (Gambar 1).

METODOLOGI

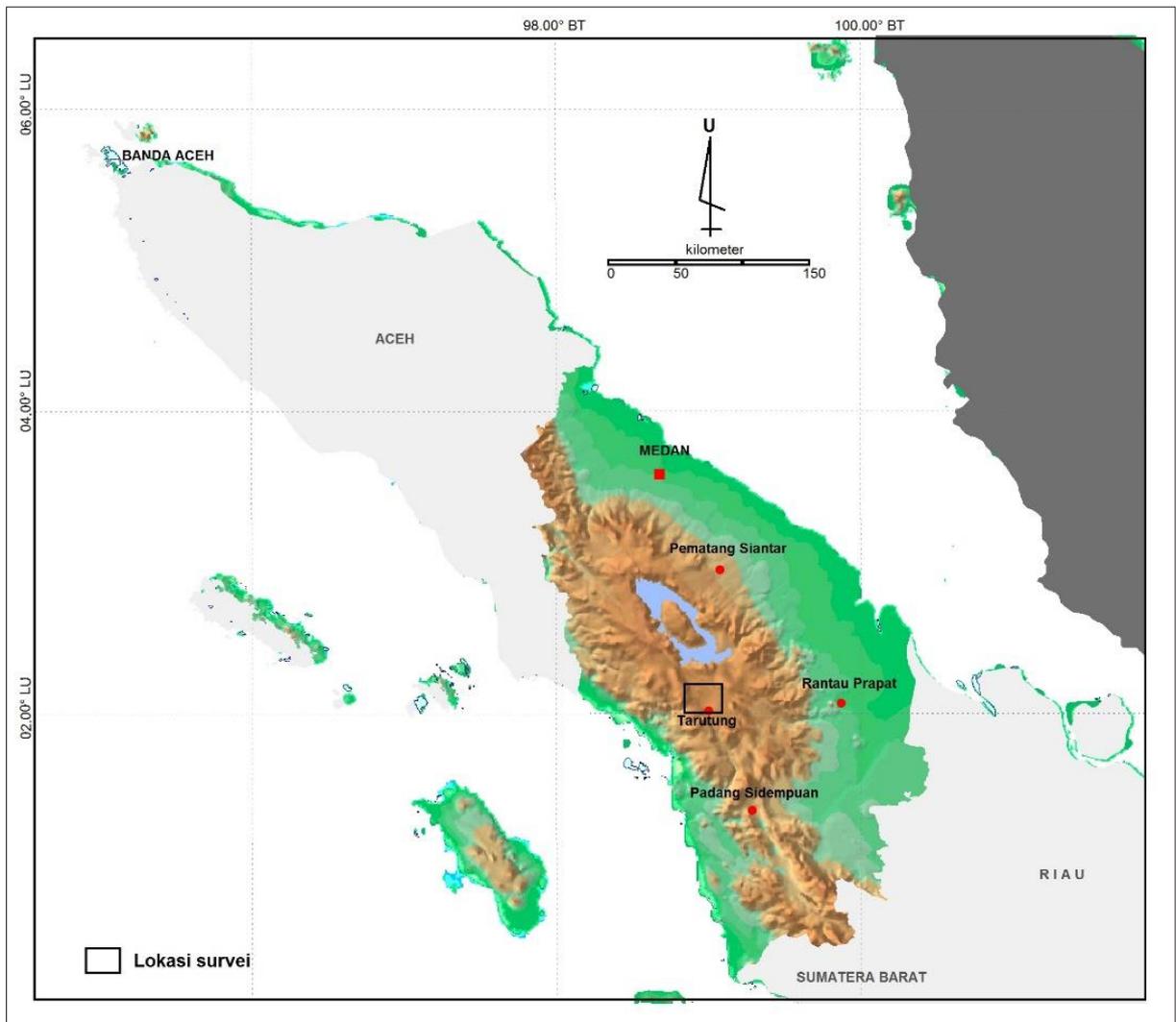
Kegiatan survei geokimia rinci di daerah panas bumi Sipoholon Ria Ria meliputi pengamatan dan pengukuran sifat fisik dan kimia manifestasi, analisis kimia fluida panas bumi, serta pengukuran kandungan merkuri dan pH tanah, serta kandungan gas karbondioksida dalam udara tanah.

Analisis kimia fluida panas bumi di Sipoholon Ria Ria hanya diperoleh dari manifestasi panas bumi berupa mata air

panas. Analisis kimia fluida dilakukan terhadap konsentrasi senyawa terlarut dan terabsorpsi di dalam fluida panasnya. Analisis area permeabel diperoleh dari sebaran konsentrasi merkuri tanah dan konsentrasi gas karbondioksida dalam udara tanah.

Analisis karakteristik fluida panas bumi diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik reservoir panas bumi, asal-muasal fluida panas bumi, dan rangkaian peristiwa perjalanan

fluida panas bumi sebelum tiba di permukaan melalui komponen perunut atau pelacak dan geoindikator berdasarkan zat yang terlarut. Analisis temperatur, pH dan konsentrasi Hg tanah serta CO₂ udara tanah diharapkan dapat memberikan indikasi zona permeabel. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat dibuat suatu model konseptual geokimia yang meliputi sumber fluida, arah aliran fluida dan perkiraan temperatur reservoir panas bumi, serta deleniasi zona permeabel.



Gambar 1 Peta indeks lokasi daerah survei

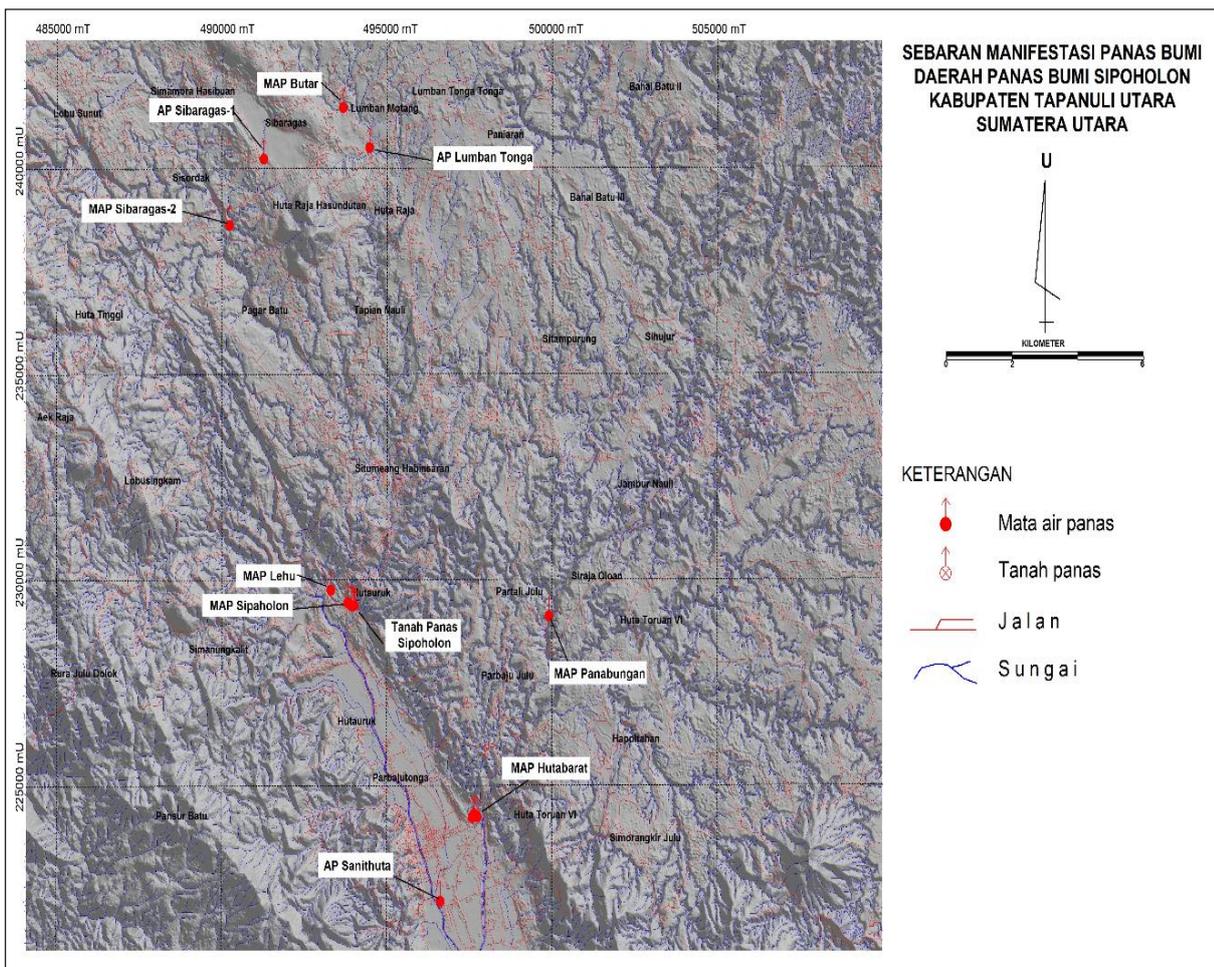
HASIL ANALISIS

Daerah panas bumi Sipoholon Ria Ria sedikitnya memiliki manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas yang tersebar di Sipoholon, Hutabarat, Panabungan, dan Pagaran. Selain manifestasi mata air panas, di daerah tersebut memiliki banyak sumur air panas serta tanah panas di area mata air panas Sipoholon (Gambar 2).

Untuk kepentingan analisis kimia fluida, diambil beberapa sampel air dan sampel gas. Sampel air berasal dari mata air panas dan air dingin. Sementara sampel

gas berasal dari bualan gas yang keluar dari mata air panas.

Hasil analisis kimia anion dan kation pada beberapa sampel air panas dan sampel air dingin memperlihatkan bahwa nilai kesetimbangan ion (*ion balance*) kurang dari atau sama dengan 5%, seperti yang terlihat dalam Tabel 1. Nilai kesetimbangan ion kurang dari 5% menunjukkan bahwa proses analisis major anion dan kation sampel airnya baik, sehingga datanya dapat digunakan untuk tahapan analisis dan interpretasi fluida panas bumi selanjutnya.



Gambar 2 Distribusi manifestasi panas bumi berupa mata air panas yang berada di daerah Panas Bumi Sipoholon Ria Ria

Secara umum konsentrasi anion dan kation air panasnya lebih tinggi dari air dingin. Konsentrasi air panas bumi terbagi ke dalam 2 kelompok pola konsentrasi, yaitu air panas bumi dengan konsentrasi anion dan kation paling tinggi dan kelompok air panas yang memiliki konsentrasi anion dan kation yang relatif tinggi dari kelompok air dingin. Konsentrasi anion dan kation air dingin relatif jauh lebih rendah dari kedua kelompok air panas tersebut. Kelompok air panas pertama memiliki pola konsentrasi lebih tinggi, terdiri dari air panas Sipoholon, Lehu, Hutabarat, dan air panas Panabungan. Kelompok air panas kedua yang memiliki konsentrasi lebih rendah dari kelompok pertama dan lebih tinggi dari konsentrasi air dingin adalah air panas Saitnihuta, Butar, Lumban Tonga, dan air panas Sibaragas. Hal

tersebut merupakan hal yang umum di dalam suatu fluida panas bumi, karena dengan temperatur yang lebih tinggi, maka proses interaksi antara air panas dengan batuan di sekitarnya menjadi lebih intensif. Asal fluida panas dari kedalaman pun umumnya memiliki konsentrasi lebih tinggi, karena kemungkinan interaksi fluida panas dengan batuan pun lebih lama, sehingga lebih intensif jika dibandingkan dengan air panas di dekat permukaan atau air meteorik. Konsentrasi Na, K, Li, Cl, F, B, HCO₃ dan SO₄ pada semua air panas kelompok pertama relatif lebih tinggi dibandingkan air panas kelompok kedua. Nilai konsentrasi unsur atau senyawa anion dan kation pada semua sampel airnya berbanding lurus dengan nilai daya hantar listrik dan nilai TDS.

Tabel 1 Hasil analisis kimia anion dan kation air di Daerah Sipoholon Ria Ria

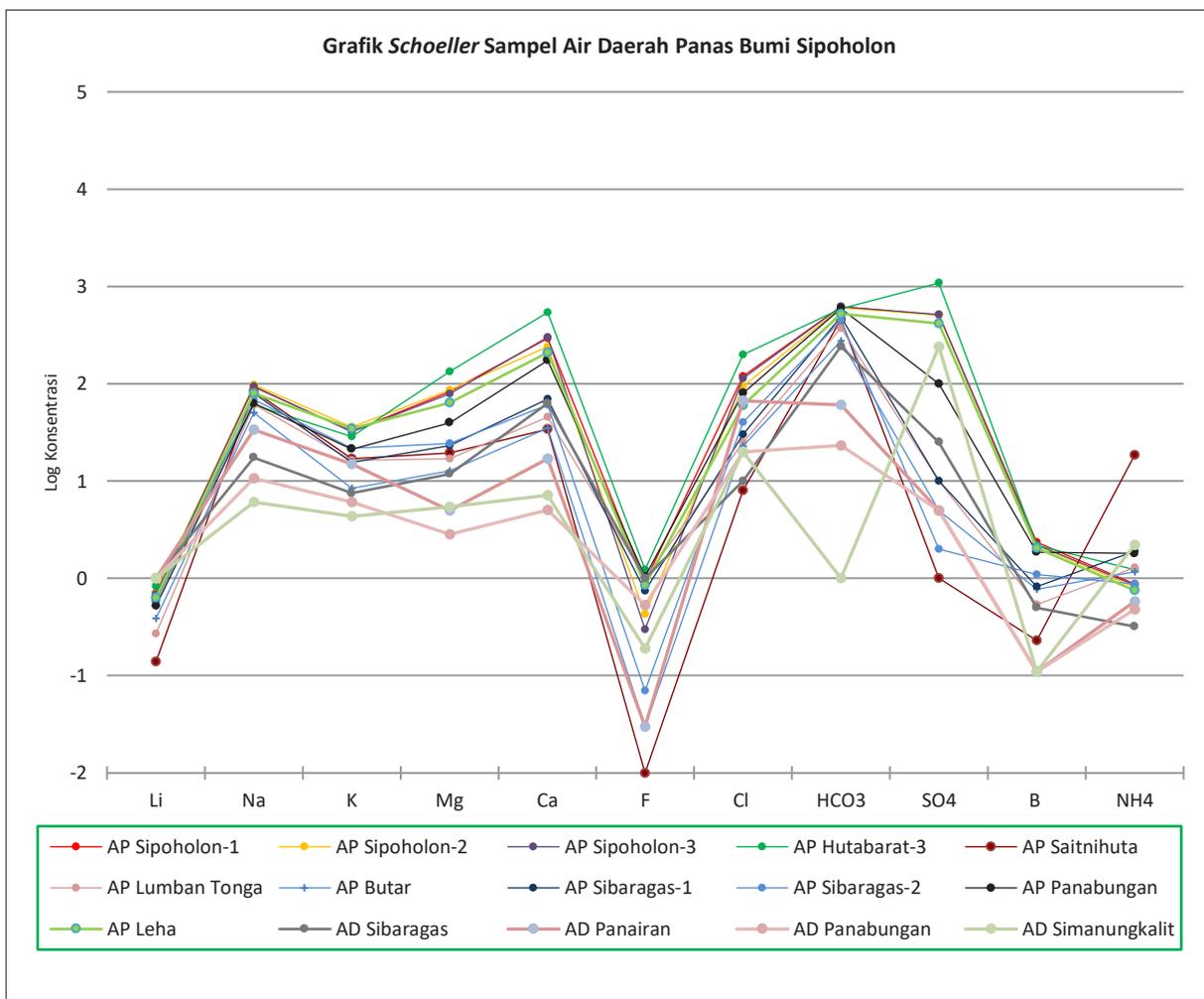
NAMA SAMPEL (KODE)	Air Panas Sipoholon-1 (APSP-1)	Air Panas Sipoholon-2 (APSP-2)	Air Panas Sipoholon-3 (APSP-3)	Air Panas Lehu (APLH)	Air Panas Panabungan (APPB)	Air Panas Hutabarat-3 (APHT-3)	Air Panas Saitnihuta (APSH)*	Air Panas Butar (APBT)	Air Panas Sibaragas-1 (APSB-1)*	Air Panas Sibaragas-2 (APSB-2)	Air Panas Lumban Tonga (APLT)*	Air Dingin Panabungan (ADPB)	Air Dingin Simanungkalit (ADSM)
pH	7,52	7,59	7,42	6,99	7,23	7,59	7,82	6,61	7,00	6,96	7,13	5,71	2,18
DHL (µs/cm)	2310	1945	2250	1770	1786	3310	704	514	895	825	703	84,30	1333,00
TDS ppm	1852	1536	1856	1380	1228	3048	556	448	688	608	604	68,00	444,00
SiO ₂ (mg/L)	106,92	104,91	106,97	102,88	186,59	67,55	186,12	178,26	164,87	206,01	220,43	118,45	84,07
B (mg/L)	2,36	2,18	2,22	2,04	1,86	2,18	0,23	0,77	0,82	1,09	0,54	0,11	0,11
Al ³⁺ (mg/L)	0,03	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,80
Fe ³⁺ (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	4,27	0,17	3,83	3,27	0,00	7,18
Ca ²⁺ (mg/L)	293,95	241,18	299,29	210,54	173,69	541,18	34,31	35,08	69,39	60,55	45,34	5,07	7,15
Mg ²⁺ (mg/L)	83,43	85,80	79,02	63,75	39,76	134,36	19,38	12,80	23,15	24,49	17,01	2,84	5,42
Na ⁺ (mg/L)	92,46	97,44	94,46	79,55	62,71	60,37	83,62	50,15	79,98	69,02	61,60	10,69	6,09
K ⁺ (mg/L)	32,52	35,95	31,93	34,80	21,37	28,54	17,06	8,40	15,60	21,75	16,24	6,05	4,31
Li ⁺ (mg/L)	0,71	0,69	0,68	0,63	0,52	0,83	0,14	0,39	0,58	0,58	0,27	0,00	0,00
As ³⁺ (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,88	0,81	0,85	0,75	1,80	1,23	18,50	1,16	1,90	0,87	1,29	0,48	2,22
F ⁻ (mg/L)	0,92	0,43	0,30	0,85	1,04	1,22	0,01	0,03	0,74	0,07	0,00	0,53	0,19
Cl ⁻ (mg/L)	119,65	93,54	113,45	60,10	80,00	200,22	8,00	23,00	30,00	40,00	25,00	20,00	20,00
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	510,00	506,76	514,53	417,77	100,00	1085,21	1,00	5,00	10,00	2,00	10,00	5,00	240,61
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	620,64	603,83	620,64	525,22	595,56	588,32	457,72	276,44	488,24	447,64	373,68	23,27	0,00
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ion Balance (%)	4,58	2,71	4,75	3,02	4,18	4,59	4,63	2,44	1,87	2,42	0,04	3,80	-31,75

* Sumur bor air panas

Hubungan beberapa sampel air berdasarkan konsentrasi anion dan kationnya terlihat pada Diagram Schoeller (Gambar 3). Pada diagram menunjukkan bahwa setidaknya terdapat 4 kelompok air, yaitu kelompok air panas relatif netral pertama dengan pola konsentrasi fluida panas bumi lebih tinggi, kelompok air panas relatif netral kedua dengan pola konsentrasi fluida panas bumi sedikit lebih rendah, kelompok air dingin dengan pola konsentrasi paling rendah, dan air dingin Simanungkalit yang asam dengan pola

konsentrasi relatif lebih tinggi dari air dingin lain.

Jika memperhatikan perbandingan pola konsentrasi keempat kelompok air tersebut, pola konsentrasi air panas terlihat memiliki kemiripan dengan pola konsentrasi air dinginnya. Perbedaan terlihat signifikan hanya pada nilai konsentrasinya saja. Kondisi demikian, sedikitnya memberikan gambaran bahwa kemungkinan terdapat hubungan antara air panas di daerah panas bumi Sipoholon dengan air meteoriknya.



Gambar 3. Pola perbandingan konsentrasi anion-kation beberapa sampel air Daerah Sipoholon Ria Ria dalam Diagram Schoeller

Karakteristik Kimia Air

Diagram Piper (Gambar 4) menunjukkan bahwa air panas kelompok pertama memiliki fluida bertipe campuran dengan dominan tipe kalsium (Ca) dan dengan fasies $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$. Konsentrasi Cl dan SO_4 yang relatif tinggi dapat mengindikasikan fluida panas yang berasal dari kedalaman. Nilai SO_4 pada sistem magmatik dapat berasal dari gas-gas magmatik seperti SO_2 dan H_2S yang terkondensasi dan muncul dalam fasa cair. Namun dalam sistem non-magmatik, hadirnya SO_4 dapat berasal dari proses pengayaan fluida dari batuan yang kaya akan sulfida. Pada manifestasi Sipoholon, Hutabarat, Leha, dan Panabungan memperlihatkan deposisi sulfur tipis yang tidak memiliki kristal dan hanya memiliki kilap tanah. Pada sistem vulkanik, sulfur yang terendapkan biasanya memiliki kristal dengan kilap kaca. Oleh karena itu, komposisi SO_4 pada sistem panas bumi tersebut dapat berasal dari deposisi sekunder, bukan berasal langsung dari magma gunung api. Nilai Ca dan Mg yang tinggi pada fluida panas bumi di permukaan dapat mengindikasikan adanya percampuran dari air permukaan sebelum muncul di permukaan sebagai mata air panas. Peningkatan unsur Ca dan Mg mungkin diakibatkan oleh pertukaran ion Na dan K dengan Ca dan Mg akibat percampuran dengan air tanah. Kelompok

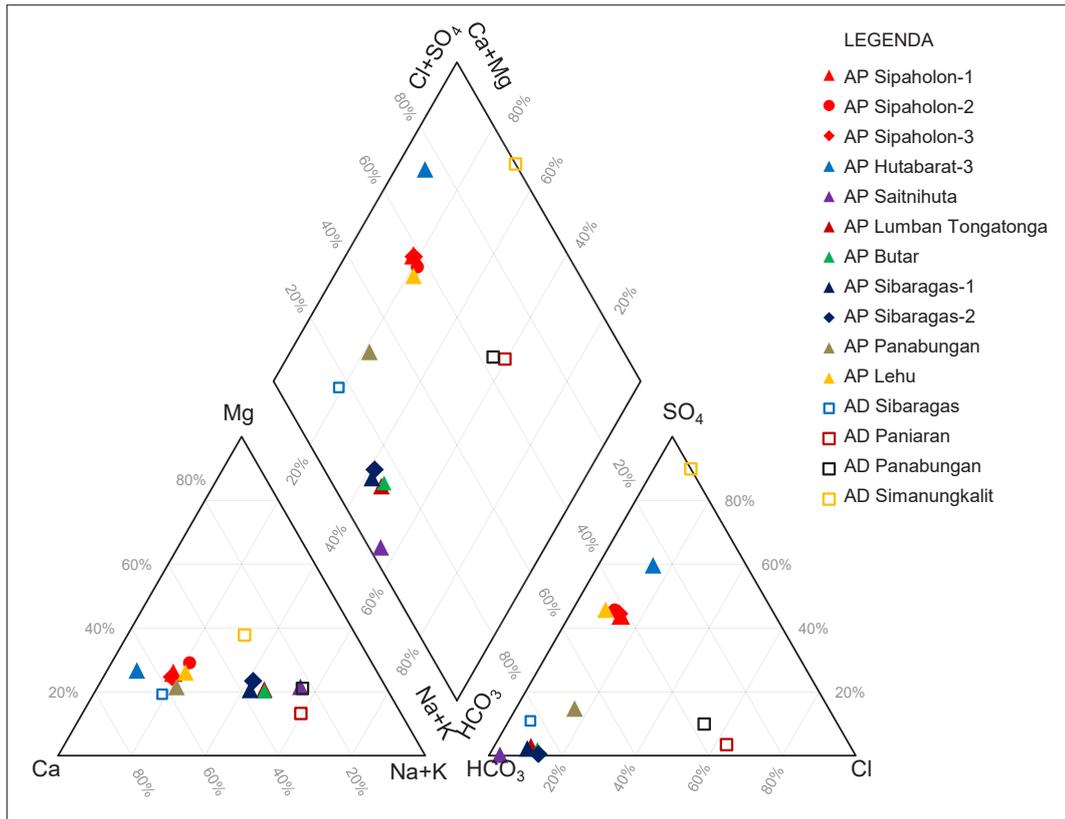
air panas kedua, meliputi air panas Saitnihuta, Butar, Sibaragas, dan Tumban Tonga memiliki fluida bertipe $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ dengan dominan tipe bikarbonat (HCO_3) dan dengan fasies $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$. HCO_3 dan Ca yang tinggi mungkin berasal dari batuan sedimen atau metamorf yang berasal dari batuan sedimen (Belhai et al, 2016; Mutlu dan Güleç, 1998). Nilai Mg yang tinggi juga dapat berasal dari batuan kaya alterasi klorit maupun batuan kaya Mg yang berinteraksi dengan fluida saat mengalir ke permukaan (Nicholson, 1993). Berdasarkan Nicholson (1993), komposisi Mg pada fluida panas bumi pada umumnya sangat rendah (0,01 to 0,1 mg/L). Unsur Mg pada fluida panas bumi dapat disebabkan oleh kontaminasi dengan fluida meteorik (Giggenbach, 1988; Reyes, et. al., 2010).

Konsentrasi anion beberapa air panas pada diagram segitiga $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ menempatkan sampel air tersebut ke dalam air panas bertipe bikarbonat hingga sulfat-bikarbonat (Gambar 5). Air panas kelompok pertama merupakan air bertipe bikarbonat dengan konsentrasi sulfat lebih tinggi. Dengan konsentrasi sulfatnya yang lebih dominan, air panas Hutabarat-3 bahkan bertipe sulfat-bikarbonatan. Sedangkan air panas Panabungan lebih dominan bikarbonatnya. Air panas kelompok kedua yang bertipe bikarbonat memiliki konsentrasi bikarbonat lebih tinggi. Air bertipe bikarbonat memiliki

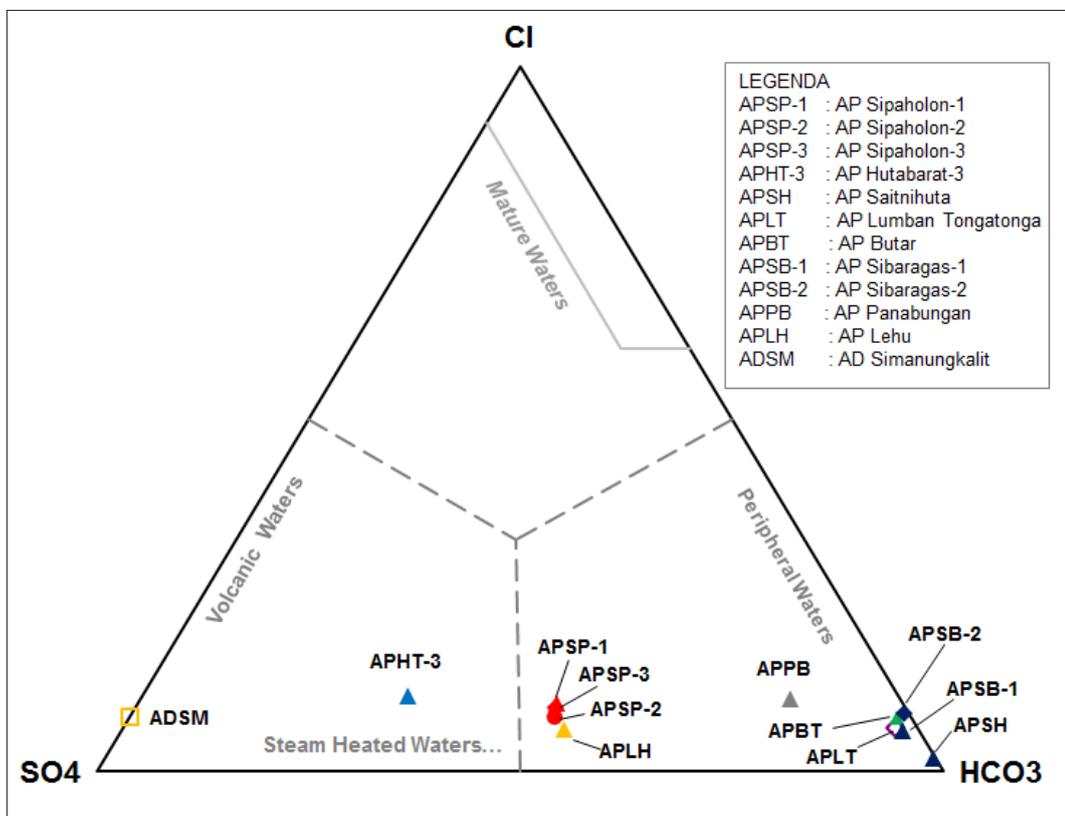
konsentrasi bikarbonat (HCO_3) yang jauh lebih dominan dibandingkan konsentrasi klorida dan sulfatnya. Rasio Cl/HCO_3 air panas kelompok pertama dan kelompok kedua terlihat kecil dan tidak terlalu berbeda, sedangkan rasio SO_4/HCO_3 air panas kelompok pertama lebih besar daripada kelompok kedua. Air bikarbonat adalah tipe air yang banyak mengandung CO_2 dan umumnya berhubungan dengan air permukaan. Air ini disebut juga sebagai *netral bicarbonate-sulphate waters*, karena merupakan produk dari proses kondensasi gas dan uap dengan air permukaan, sehingga menjadi mata air bawah tanah yang miskin oksigen.

Air panas kelompok pertama yang bertipe bikarbonat mengandung konsentrasi HCO_3 mencapai 620 mg/L dan masih memiliki konsentrasi sulfat mencapai 514 mg/L bahkan 1085,2 mg/L untuk air panas Hutabarat-3, namun pH airnya relatif netral. Jika memperhatikan kondisi air bikarbonat seperti demikian, maka konsentrasi karbonat yang tinggi dapat dihubungkan dengan kemungkinan pengkayaan air panas oleh batuan sampling yang mengandung unsur karbonat. Bikarbonat yang terlarut pada air panas kemudian mengendap kembali di permukaan sebagai endapan travertin

seperti yang terlihat sangat intensif di mata air panas Sipoholon, Hutabarat, Panabungan dan Air panas Leha. Pada mata air panas kelompok pertama pun umumnya memiliki bualan gas yang cukup kuat dan menerus. Bualan gas tersebut diperkirakan berhubungan dengan gas karbondioksida yang lebih tinggi sebagai akibat dari konversi HCO_3 menjadi CO_2 di dekat permukaan. Oleh karena hal tersebut, konsentrasi bikarbonat yang signifikan diperkirakan berasal dari proses pengkayaan dari batuan sampling dan pengaruh air permukaan. Air bikarbonat pada kelompok kedua mungkin lebih dominan berhubungan dengan produk proses kondensasi gas dan uap dengan air permukaan yang semakin dominan sehingga membentuk mata air bawah tanah yang miskin oksigen, yaitu sebagai *netral bicarbonate waters*. Semakin tinggi konsentrasi sulfat hasil kondensasi uap atau gas oleh air permukaan dibandingkan dengan konsentrasi bikarbonat dari air permukaan, maka air yang terbentuk menjadi bersifat asam seperti yang terjadi pada air dingin Simanungkalit. Pada air dingin Simanungkalit memiliki konsentrasi SO_4 sebesar 240 mg/L, namun tidak terdeteksi konsentrasi HCO_3 atau bernilai 0 (nol) mg/L.



Gambar 4. Sampel air daerah panas bumi Sipaholon dalam Diagram Piper



Gambar 5. Sampel air daerah panas bumi Sipaholon dalam diagram Cl-SO₄-HCO₃

Diagram segi tiga Cl-Li-B (Gambar 6) memperlihatkan air panasnya berada pada zona *Li loss* atau absorpsi B dan Cl oleh batuan dan mengarah pada proses absorpsi B/Cl yang lebih rendah. Fluida panas bumi kelompok pertama bergerak lebih jauh ke luar zona *Li loss*, diperkirakan bergerak sedikit lebih jauh dari reservoir di kedalaman atau dapat juga diduga erasal dari sistem panas bumi yang lebih tua. Proses absorpsi B/Cl lebih rendah lagi pada air panas Hutabarat-3, fluidanya bergerak lebih jauh lagi dari zona *Li loss*. Sedangkan fluida panas bumi kelompok kedua sedikit lebih masuk di zona *Li loss*, diperkirakan masih lebih tinggi tingkat absorpsi B dan Cl oleh batuan. Pada saat yang sama selain berinteraksi dengan batuan samping pada saat fluida masih lebih tinggi temperaturnya, sejalan dengan berkurangnya konsentrasi Li dan bertambahnya konsentrasi B dan Cl, pada kedalaman yang lebih dangkal kemungkinan mengalami proses pencampuran dengan air permukaan.

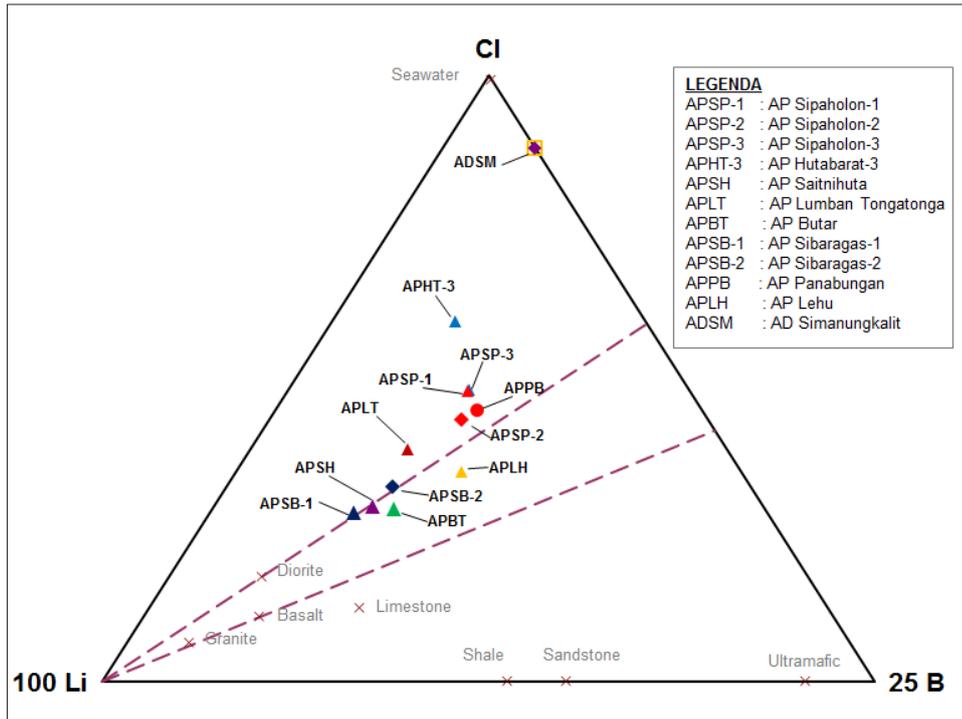
Kondisi air panasnya dalam segi tiga Cl-Li-B dapat dikatakan terbagi menjadi 2 kluster, yaitu kluster pertama yang bergerak lebih jauh dari zona *Li loss* dan kluster kedua terdiri air panas yang berada pada zona *Li loss*. Kluster pertama adalah kelompok air panas Sipoholon, Panabungan, Hutabarat dan air panas Leha, sedangkan kluster kedua terdiri dari air panas Lumban Tonga, Sibaragas, Butar, dan air panas Saitnihuta. Kondisi ini

secara umum dapat digunakan sebagai pendekatan bahwa setidaknya terbentuknya dua kluster tersebut diakibatkan karena berasal dari sumber fluida atau reservoir panas bumi yang berbeda. Namun jika memperhatikan air panas Saitnihuta yang lokasi kemunculannya berada sangat jauh dari kluster kedua (kelompok Sibaragas) dan lokasinya lebih dekat dengan Hutabarat, maka kemiripan rasio Cl dan B tersebut tidak berlaku sebagai petunjuk kemungkinan berasal dari reservoir yang sama. Hal ini lebih memperjelas keterkaitan bahwa air panas Saitnihuta, sebagai air dari sumur bor yang memiliki karakteristik kimia mirip dengan kelompok air panas Sibaragas di utara adalah sebagai pengaruh lingkungan geologinya yang sama-sama berada pada bagian tengah hingga pinggir dari zona depresi. Sementara kelompok air panas Sipoholon, Panabungan, dan Hutabarat berada pada bagian blok besarnya, yaitu pada elevasi lebih tinggi. Hal ini terlihat bahwa pada air kluster kedua memiliki konsentrasi Fe dan SiO₂ lebih tinggi sebagai pengaruh dari lebih intensifnya interaksi antara fluida panas dengan batuan pengisi zona depresi yang lebih kaya akan endapan tuf yang kaya silika.

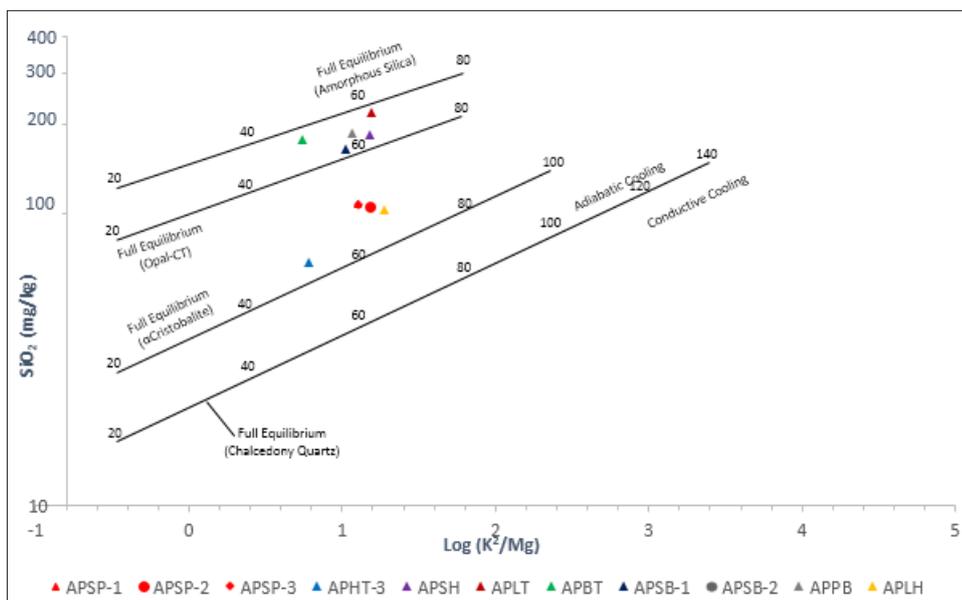
Analisis geoindikator berdasarkan konsentrasi unsur terlarut dalam fluida panas bumi mencoba mendekati asal-usul atau kemungkinan kesamaan sumber fluida atau reservoir panas bumi dengan

perbandingan Cl terhadap B. Berdasarkan rasio Cl/B menunjukkan bahwa setidaknya terdapat kemungkinan air panas Sipoholon, Leha, dan air panas Panabungan berasal dari sumber yang sama dengan nilai rasio sekitar 15. Air

panas Hutabarat diperkirakan berasal dari reservoir tersendiri dengan rasio 28. Sedangkan kelompok air panas di bagian utara, yaitu air panas Sibaragas dan Butar memiliki rasio sekitar 10.



Gambar 6. Sampel 1 air daerah panas bumi Sipoholon dalam diagram segitiga Cl-Li-B



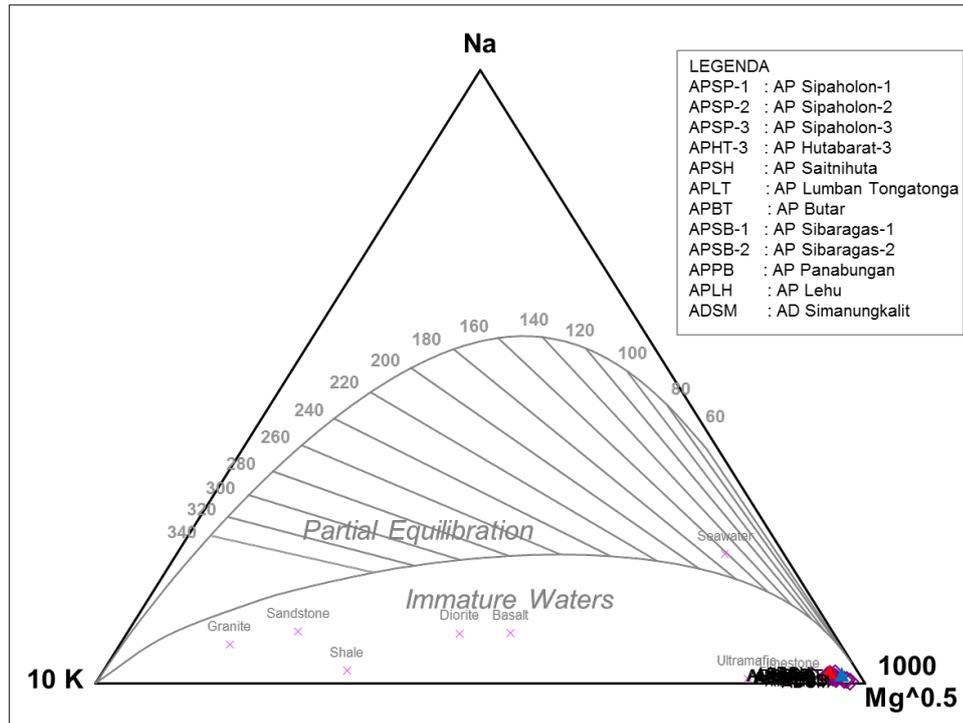
Gambar 7. Grafik perbandingan konsentrasi silika dan K-Mg air panas Daerah Sipoholon

Sistem SiO₂ dan K-Mg berdasarkan komposisi terlarutnya di dalam air, merespon paling cepat terhadap perubahan temperatur dan dengan kecepatan yang sebanding (Giggenbach et. al., 1994). Konsentrasi silika pada air panas mungkin dipengaruhi oleh solubilitas mineral silika yang berbeda-beda, seperti halnya mineral silika dengan kelarutan menengah (misalnya opal atau α -kristobalit) untuk air bikarbonat. Sampel air di Sipoholon yang secara umum bertipe bikarbonat, pada geotermometer K-Mg terplot pada temperatur sekitar 50°C - 66°C pada kelarutan mineral silika opal dan α -kristobalit. Temperatur mata air panas umumnya adalah 40°C - 64°C. Temperaturnya menunjukkan nilai yang serupa namun dengan nilai maksimum sedikit lebih tinggi. Perbedaan sedikit antara temperatur geotermometer K-Mg dengan temperatur manifestasi dapat menunjukkan bahwa air bikarbonat dialirkan ke permukaan dari akuifer air panas yang relatif dangkal. Meskipun nilai konsentrasi HCO₃, Ca, K, SO₄, DHL dan TDS pada air panasnya cukup tinggi, mengindikasikan adanya sirkulasi fluida pada kedalaman yang memungkinkan terjadinya pengayaan dari proses interaksi antara fluida panas dengan batuan.

Analisis kesetimbangan fluida panas bumi dalam diagram segi tiga Na, K, dan Mg (Gambar 8) memperlihatkan bahwa tidak terdapat satu sampel air panas pun di Sipaholon yang menunjukkan

bahwa airnya hasil dari proses kesetimbangan (*equilibrium*) antara unsur atau senyawa penyusun batuan dengan unsur atau senyawa di dalam fluida panas buminya. Semua air panasnya tidak mengalami proses kesetimbangan (*immature water*), terplot tepat pada pada sumbu Mg yang mengindikasikan keberadaan air meteorik sekaligus mencerminkan konsentrasi Mg yang tinggi. Meskipun semua air panasnya terplot pada area *immature*, namun air panasnya mengalami pengayaan ion Na dan K. Secara umum, tingginya komposisi Na pada sistem panas bumi bertemperatur tinggi berasal dari kesetimbangan antara Na dan K pada reaksi pertukaran ion antara alkali feldspar (Na-feldspar dan K-feldspar) (Nicholson, 1993).

Semakin air bergerak mendekati permukaan, kontaminasi dari unsur Mg akan semakin banyak dan akan menyebabkan reaksi kesetimbangan semakin rusak. Kondisi ini adalah kondisi *immature waters*, kondisi dimana air panasnya sudah mengalami perubahan konsentrasi N, K, dan Mg akibat adanya pengaruh pencampuran dengan air permukaan. Ketika tidak terjadi kesetimbangan dalam air panas tersebut atau adanya proses lain yang mengakibatkan fluida dari reservoir menjadi mengalami perubahan konsentrasi unsur-unsurnya, maka perkiraan temperatur bawah permukaan dengan air tersebut pun tidak dapat dilakukan.



Gambar 8. 2 Air panas daerah Sipoholon dalam diagram segitiga Na-K-Mg

Karakteristik Kimia Gas

Analisis kimia gas dilakukan terhadap 7 sampel gas yang berasal dari gelembung atau bualan gas (*gas bubble*) yang terdapat pada mata air panas Sipoholon, Hutabarat, Panabungan, Sibaragas, dan mata air dingin Simanungkalit. Hasil analisisnya bahwa terdeteksi konsentrasi gas H_2 , O_2 , Ar, N_2 , CH_4 , H_2S , dan CO_2 .

Berdasarkan diagram N_2 -He-Ar (Gambar 9), ketujuh sampel gas cenderung berada pada garis N_2 -Ar, bahkan beberapa berada pada pojok Ar dengan perbandingan N_2/Ar tertinggi hanya sebesar 21 dan tidak mengandung He. Kecuali sampel gas Simanungkalit yang berasal dari mata air dingin yang memiliki rasio N_2/Ar sebesar 24 dan He/Ar sebesar

$1,3 \times 10^{-2}$. Jika nilai rasio $N_2/Ar = 84$ dan $He/Ar = 5,7 \times 10^{-4}$, maka konsentrasi gas yang terkandung dalam sampel mengalami kontaminasi dengan udara bebas. Sementara itu, jika nilai rasio $N_2/Ar = 38$ dan $He/Ar < 0,001$, maka konsentrasi gas yang terkandung dalam sampel berkaitan dengan meteorik (*air saturated water*). Adapun nilai rasio N_2/Ar yang melebihi nilai batas antara 38 (*air saturated water*) hingga 84 (*free air*) mengindikasikan bahwa gas berkaitan dengan sedimen (*organic matter*).

Rasio N_2/Ar pada gelembung air panasnya menunjukkan nilai di bawah batas meteorik (*air saturated water*), mengindikasikan bahwa gasnya kemungkinan berkaitan dengan meteorik. Untuk sampel gas Simanungkalit

memperlihatkan adanya konsentrasi He, sehingga bergeser sedikit menuju pojok He. Gas He sebagai salah satu gas mulia yang dapat berasal dari kontribusi air meteorik dan reaksi *leaching* batuan (Nicholson, 1993). Oleh karena itu gas Simanungkalit diduga sebagai hasil dari proses *leaching* batuan sulfida (alterasi batuan dengan komposisi mineral sulfida) yang asam, sehingga menghasilkan air yang bersifat asam kuat.

Gas CO₂ merupakan gas yang konsentrasinya sangat dominan dalam semua sampel gas tersebut, yaitu mencapai 98,9%mol, diikuti oleh gas-gas minor di bawah 2%mol. Gas CO₂ merupakan gas yang paling melimpah dalam sistem panas bumi, dapat merupakan hasil proses kondensasi gas dan uap menjadi mata air bawah tanah yang miskin oksigen (*outflow*) atau mungkin juga sebagai gas magmatik yang hadir bersamaan dengan N₂. Gas CO₂ dapat berasal dari alterasi panas batuan/mineral karbonat dan degradasi material organik dalam batuan sedimen pada kedalaman tertentu atau dekat permukaan. Gas CO₂ dapat berasal dari unsur terlarut dalam air meteorik (terutama konversi senyawa HCO₃ menjadi CO₂ ketika *boiling*) dan dapat juga berasal dari magmatik (Nicholson, 1993).

Konsentrasi N₂ pada semua sampelnya diikuti oleh kehadiran gas Ar. Kehadiran gas N₂ dapat berasal dari gas yang terlarutkan dalam *recharge* air

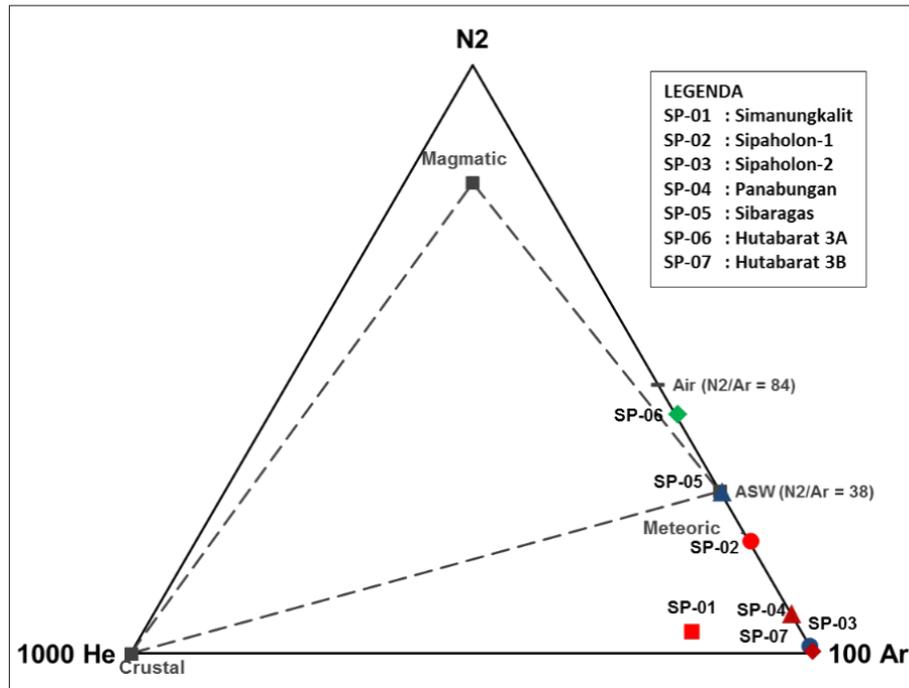
meteorik atau dapat juga berasal dari gas magmatik. Oleh karena itu, hadirnya konsentrasi CO₂ dan N₂ pada 7 sampel gas tersebut dapat mengindikasikan asosiasi dengan gas magmatik dari bawah permukaan, namun juga berasosiasi dengan unsur terlarut dalam air meteorik.

Sampel gas dari Sipoholon dan Panabungan memiliki konsentrasi gas H₂S, yaitu berkisar antara 0,13%mol hingga 0,61%mol, merupakan salah satu indikator gas yang berasal dari sumber panas magmatik. Gas H₂S bersifat *soluble* yang berarti mudah larut dalam air (Nicholson, 1993). Oleh karena itu, konsentrasi H₂S yang hadir dalam sampel gas yang diambil berupa gelembung dari mata air panas pun menjadi kurang meyakinkan berasal dari sumber panas magmatik. Biasanya gas H₂S yang berasal dari sumber panas magmatik diikuti pula oleh kehadiran HCl, namun pada sampel gas tersebut tidak terdeteksi adanya gas HCl.

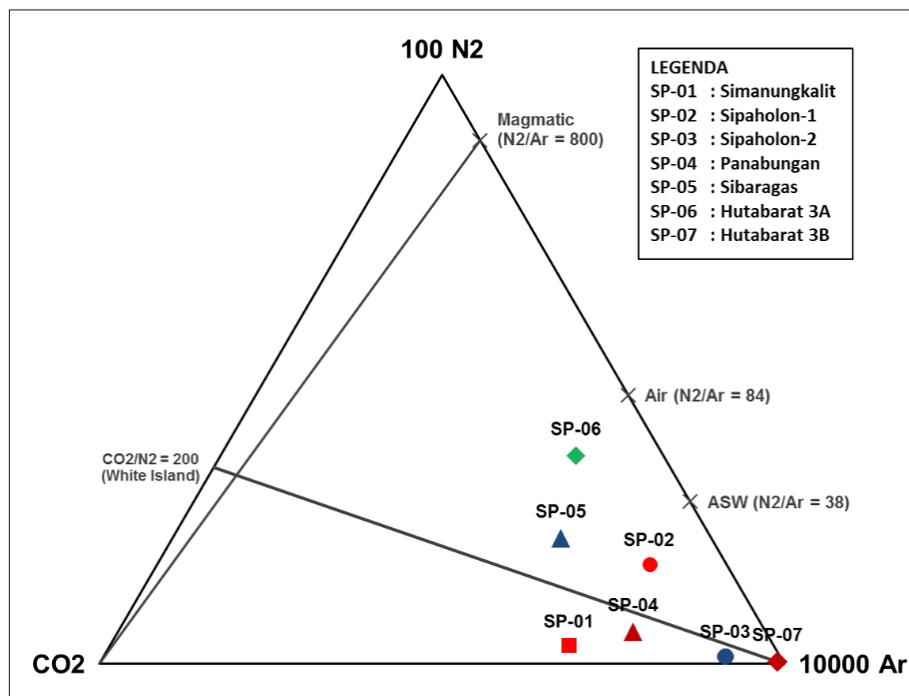
Selain gas N₂, H₂S, CO₂, Ar, dan gas He, sampel gasnya juga mengandung gas metan (CH₄). Konsentrasi CH₄ pada semua sampel gas tersebut hadir hingga 0,07%mol. Gas CH₄ merupakan gas hidrokarbon yang paling sering dijumpai dalam sistem panas bumi. Gas ini dapat berasal dari alterasi batuan sedimen pada kedalaman tertentu. Hal tersebut biasanya didukung oleh rasio N₂/Ar yang tinggi. Rasio N₂/Ar yang melebihi nilai batas antara 38 (*air saturated water*) hingga 84 (*free air*) mengindikasikan bahwa gas

berkaitan dengan sedimen. Perbandingan rasio N_2/Ar terhadap CO_2/CH_4 dapat membantu mengetahui asal-muasal atau sumber gasnya. Seperti halnya sampel gas di Sipoholon yang berada pada area

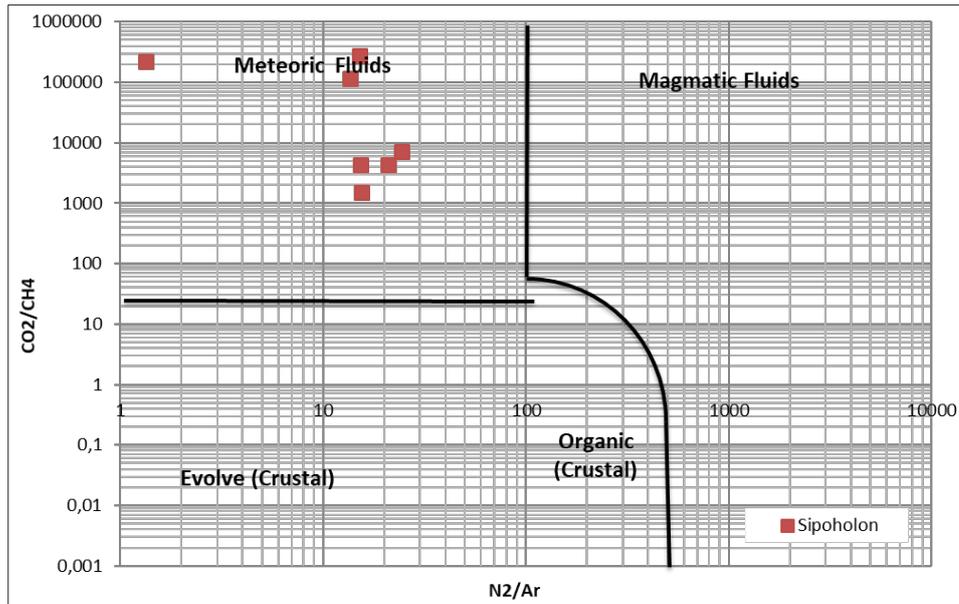
meteoric (Gambar 11) diduga berasal dari udara atmosferik atau udara permukaan pada air meteorik dengan nilai $N_2/Ar < 38$ dan $He/Ar > 0,001$.



Gambar 9. Konsentrasi gas 3 Daerah Sipoholon pada diagram segitiga N_2 -He-Ar



Gambar 10. Konsentrasi gas 4 Daerah Sipoholon pada diagram segitiga N_2 - CO_2 -Ar



Gambar 11. Grafik perbandingan konsentrasi gas $5N_2-CO_2-Ar-CH_4$ pada sampel air Daerah Sipoholon

Analisis Isotop ^{18}O dan 2H

Analisis isotop stabil dilakukan terhadap 21 sampel air dari Daerah Sipoholon, yaitu analisis isotop oksigen-18 (^{18}O) dan deuterium (2H). Kandungan isotop oksigen-18 dan deuterium dalam semua sampel air panas Sipoholon tidak besar jika dibandingkan dengan sampel air dinginnya. Kandungan isotop oksigen-18 air panas berkisar pada $-9,85\text{‰}$ hingga $-10,31\text{‰}$ dan kandungan deuteriumnya berkisar antara $-64,59\text{‰}$ hingga $-67,55\text{‰}$. Sementara air dinginnya memiliki isotop oksigen-18 berkisar pada $-8,39\text{‰}$ hingga $-9,74\text{‰}$ dan kandungan deuteriumnya berkisar antara $-56,41\text{‰}$ hingga $-61,64\text{‰}$. Hal ini menunjukkan kemungkinan bahwa interaksi antara fluida panas bumi dengan batuan tidak intensif dan hampir semua air panasnya berhubungan dengan air meteoriknya.

Grafik hubungan antara isotop oksigen-18 ($\delta^{18}O$) dan deuterium (δ^2H) dengan persamaan air meteorik lokal (*meteoric water line*) $\delta D = 8\delta^{18}O + 14$, memperlihatkan bahwa semua air panas Sipoholon persis berada bersamaan dengan air dingin pada area garis persamaan air meteorik lokal. Hanya air dingin Simanungkalit (ADSM) yang sangat asam saja yang relatif bergerak menjauh ke bagian kiri dari garis air meteorik lokal (Gambar 12). Hasil plotting data isotop stabil air menunjukkan terdapat korelasi antara data kimia air dengan data isotop, keduanya menunjukkan bahwa memiliki keterkaitan erat dengan air meteorik. Beberapa air panasnya mengalami pergeseran ke bagian titik perpotongan aksis dan ordinat, menunjukkan bahwa terjadi pengurangan oksigen-18 maupun deuteriumnya. Hal tersebut diindikasikan

sebagai air hasil kondensasi uap panas terhadap air meteorik. Sedangkan air dingin Simanungkalit diperkirakan sebagai akibat dari proses hidrasi batuan mengandung sulfida.

Temperatur Bawah Permukaan

Pendugaan temperatur bawah permukaan atau reservoir panas bumi daerah panas bumi Sipoholon dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan geotermometer zat terlarut pada sampel air panas. Perhitungan geotermometer gas dari sampel gasnya tidak dapat dilakukan, karena hasil analisis asal-muasal gasnya menunjukkan bahwa gasnya dominan berasal dari unsur terlarut dalam air meteorik, terutama konversi senyawa HCO_3 menjadi CO_2 ketika *boiling*. Gas yang terdapat pada sampel gas dari gelembung mata air panas tidak dapat dianggap hasil suatu proses kesetimbangan, sehingga perhitungan geotermometer gas tidak dapat dilakukan.

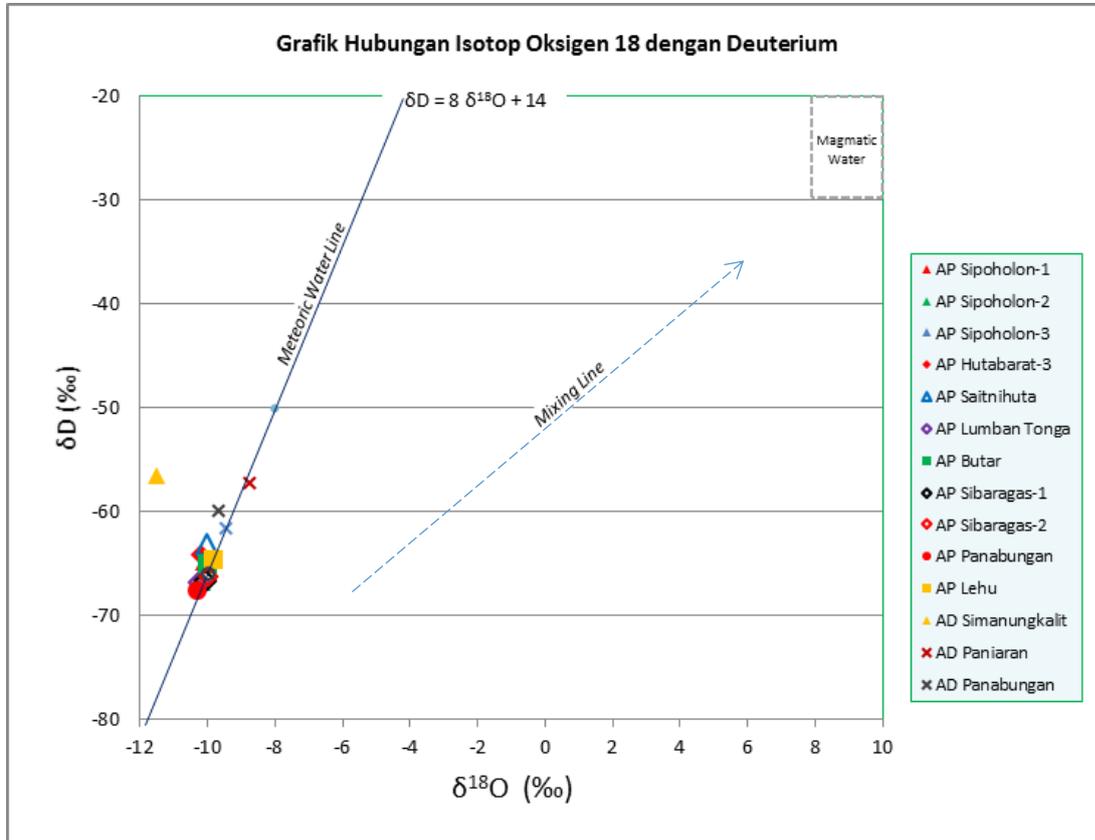
Pendugaan temperatur dengan geotermometer unsur terlarut idealnya dilakukan pada sampel fluida bertipe klorida dengan pH netral sebagai fluida hasil kesetimbangan, baik kesetimbangan sebagian maupun kesetimbangan seluruhnya. Namun prasyarat fluida ideal tersebut tidak terpenuhi oleh air panas di Sipoholon. Unsur terlarut yang digunakan dalam perhitungan adalah berasal dari sampel air panas bertipe bikarbonat dan ber-pH netral, namun diperkirakan tidak

mengalami kesetimbangan. Perhitungan geotermometer unsur terlarut meliputi *quartz conductive*, *quartz adiabatic*, Na-K-Ca, Na-K-Ca (*Mg correction*), Na/K (Fournier, 1979), Na/K (Truesdell, 1976), dan Na/K (Giggenbach, 1988), seperti terlihat hasilnya pada Tabel 2.

Mempertimbangkan keterbatasan kondisi fluida yang diperoleh di Sipoholon tersebut di atas, maka geotermometer unsur terlarut yang digunakan dalam perhitungan ini adalah geotermometer silika. Geotermometer silika memiliki batasan temperatur sebesar 250°C , karena pada temperatur yang lebih tinggi silika akan terlarut dan terpresipitasi sangat cepat sehingga konsentrasi silika dalam larutan tidak akan konstan saat fluida bergerak naik (Nicholson, 1993). Geotermometer *quartz conductive* dan *adiabatic* yang tergolong sebagai geotermometer silika dapat diterapkan untuk mengestimasi temperatur sistem lebih dari 150°C . Akan tetapi, temperatur mata air panas biasanya justru lebih rendah dari 100°C . Hal tersebut mengindikasikan kemungkinan mata air panasnya telah mengalami pengenceran (*dilution*) yang dapat mempengaruhi geotermometer silika. Pada dasarnya, geotermometer silika dikontrol oleh solubilitas silika berdasarkan temperatur (Nicholson, 1993). Dalam hal ini, pendekatan perhitungan geotermometer silika untuk mengestimasi temperatur sistem panas bumi Sipoholon adalah

menggunakan geotermometer *quartz conductive*. Asumsi yang digunakan dalam perhitungan geotermometer tersebut ialah

manifestasi mata air panas mengalami proses *conductive cooling* dengan temperatur lebih rendah dari 100°C.



Gambar 12 Grafik isotop $\delta^{18}\text{O}$ terhadap $\delta^2\text{H}$ sampel air Daerah Sipoholon

Tabel 2 Hasil perhitungan geotermometer unsur terlarut pada sampel air panas

NAMA AIR PANAS	GEOTERMOMETER (°C)						
	Kuarsa (No Steam Loss)	Kuarsa (Max. Steam Loss)	Na/K (Fournier)	Na/K (Truesdell)	Na/K (Giggenbach)	Na/K/Ca	Na/K/Ca (Koreksi Mg)
AP Sipoholon-1	141	136	355	379	358	78	67
AP Sipoholon-2	140	135	362	390	364	86	55
AP Sipoholon-3	141	136	350	371	353	77	71
AP Panabungan	176	164	351	373	354	71	71
AP Hutabarat-3	117	115	400	450	397	57	57
AP Lehu	139	134	388	430	386	86	62
AP Butar	173	162	266	251	277	73	61
AP Sibaragas-2	183	170	340	357	344	97	50
AP Lumban Tonga *	187	174	317	323	324	92	55
AP Saitnihuta *	176	164	287	280	296	203	29

Ket: * Air sumur panas

Hasil perhitungan berdasarkan geotermometer kuarsa konduktif (*no steam loss*) tersebut adalah berkisar antara 117°C hingga 183°C. Pada geotermometer Na-K-Ca, meskipun prasyarat konsentrasi Ca dan rasio Na-Ca memenuhi, namun perhitungan yang menghasilkan temperatur di bawah 120°C kurang dapat dipercaya, karena pada temperatur tersebut konsentrasi natrium (Na) dan potassium (K) dipengaruhi oleh mineral lempung dan tidak lagi dikontrol oleh reaksi pertukaran ion pada feldspar (Nicholson, 1993).

Analisis Tanah dan Udara Tanah

Survei tanah dan udara tanah hanya dilakukan di bagian utara dari area air panas Sipoholon dan Panabungan hingga ke area sekitar kelompok air panas Sibaragas dan Butar.

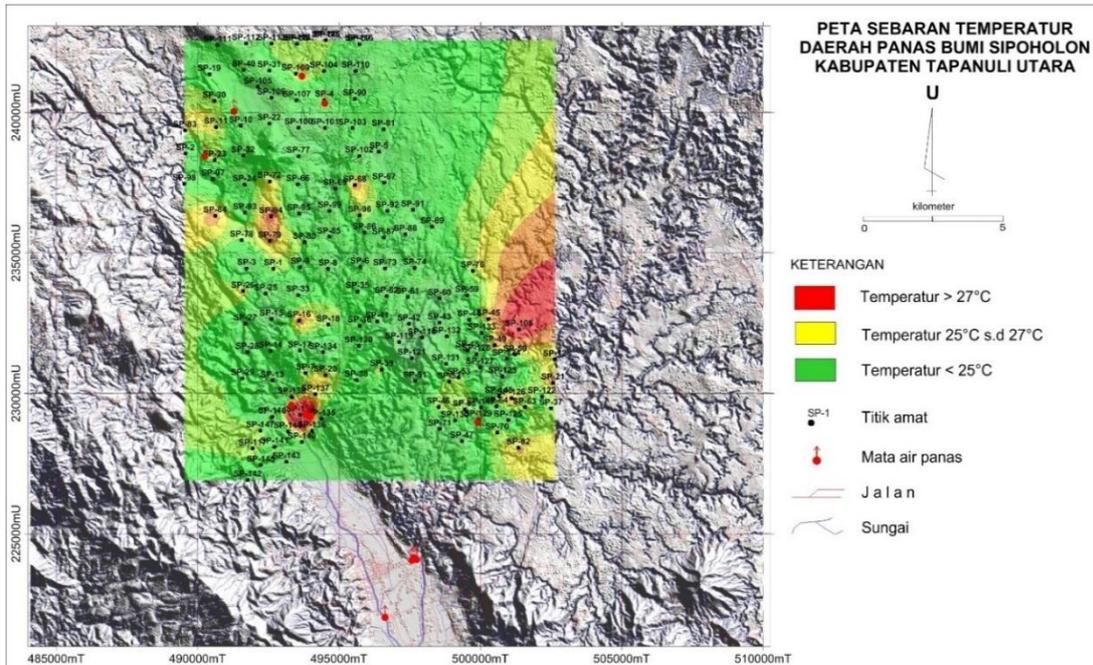
Hasil analisis tanah dan udara tanah yang terlihat signifikan dan memiliki korelasi dengan kehadiran sistem panas bumi di daerah Sipoholon adalah distribusi temperatur dan karbondioksida (CO₂) udara tanah. Kehadiran konsentrasi merkuri (Hg) tanah dan pH tanah tidak terlalu signifikan keterkaitannya dengan sistem panas bumi di daerah tersebut. Analisis distribusi Hg dan CO₂ diharapkan menghasilkan zona distribusi nilai konsentrasi di atas nilai anomali, yaitu dibutuhkan dalam membantu menentukan area atau zona permeabilitas tinggi sebagai indikasi area prospek panas bumi.

Pengukuran temperatur udara tanah pada lobang dengan kedalaman sekitar 1 meter menunjukkan bahwa temperaturnya pada rentang 22,7°C hingga 7,0°C, dengan rata-rata sebesar 25,0°C. Variasi temperaturnya memiliki nilai *background* 26,0 dan standar deviasi sebesar 1,04°C, sehingga nilai anomali tinggi temperaturnya sebesar 27,1°C. Sebaran temperatur yang memiliki anomali tinggi berada di area yang tidak terlalu luas di sekitar mata air panas Sipoholon. Anomali temperatur tinggi di lokasi ini diperkirakan berhubungan dengan kehadiran kompleks manifestasi mata air panas dan tanah panasnya. Mata air panas Leha yang di bagian barat mata air panas Sipoholon sebagai lokasi terluar dari sebaran anomali tersebut. Sementara setempat-setempat di lokasi lain di bagian utara dengan nilai mendekati anomalnya, lebih berhubungan dengan kondisi temperatur udara luar yang tinggi ketika dilakukan pengukuran.

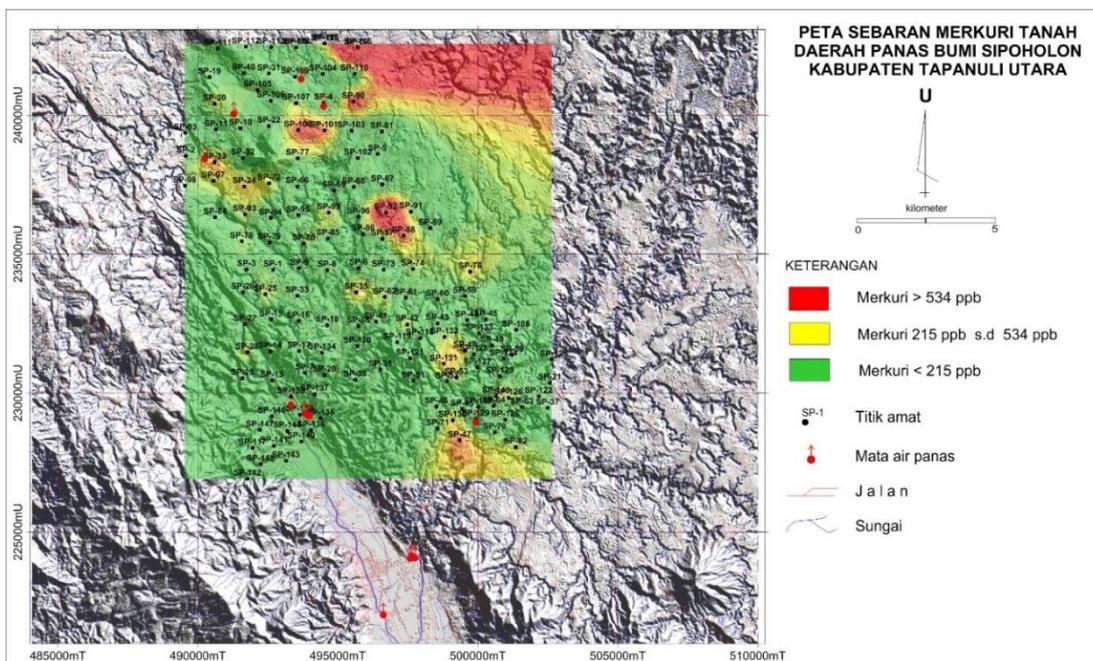
Konsentrasi unsur merkuri (Hg) dalam tanah di Daerah Sipoholon muncul pada rentang nilai 4,9 ppb hingga 659,7 ppb dengan rata-rata sebesar 215,0 ppb. Dengan nilai standar deviasi sebesar 159,4, maka nilai anomali tinggi unsur Hg adalah sebesar 534,0 ppb. Sebaran konsentrasi merkuri yang memiliki anomali tinggi berada di area sempit dan setempat di bagian timur laut air panas Sipoholon (Gambar 14). Anomali Hg tinggi sepertinya tidak memiliki korelasi yang erat terhadap

aktivitas hidrotermal sistem panas bumi Sipoholon. Sebaran nilai konsentrasi merkuri sedang hingga anomali tinggi diperkirakan berasosiasi dengan keterdapatan struktur sesar, seperti

menunjukkan pola arah barat-laut-tenggara. Diharapkan kehadiran anomali merkuri tinggi tersebut mencerminkan zona permeabilitas lebih tinggi dari sekitarnya yang berasosiasi dengan zona sesar.



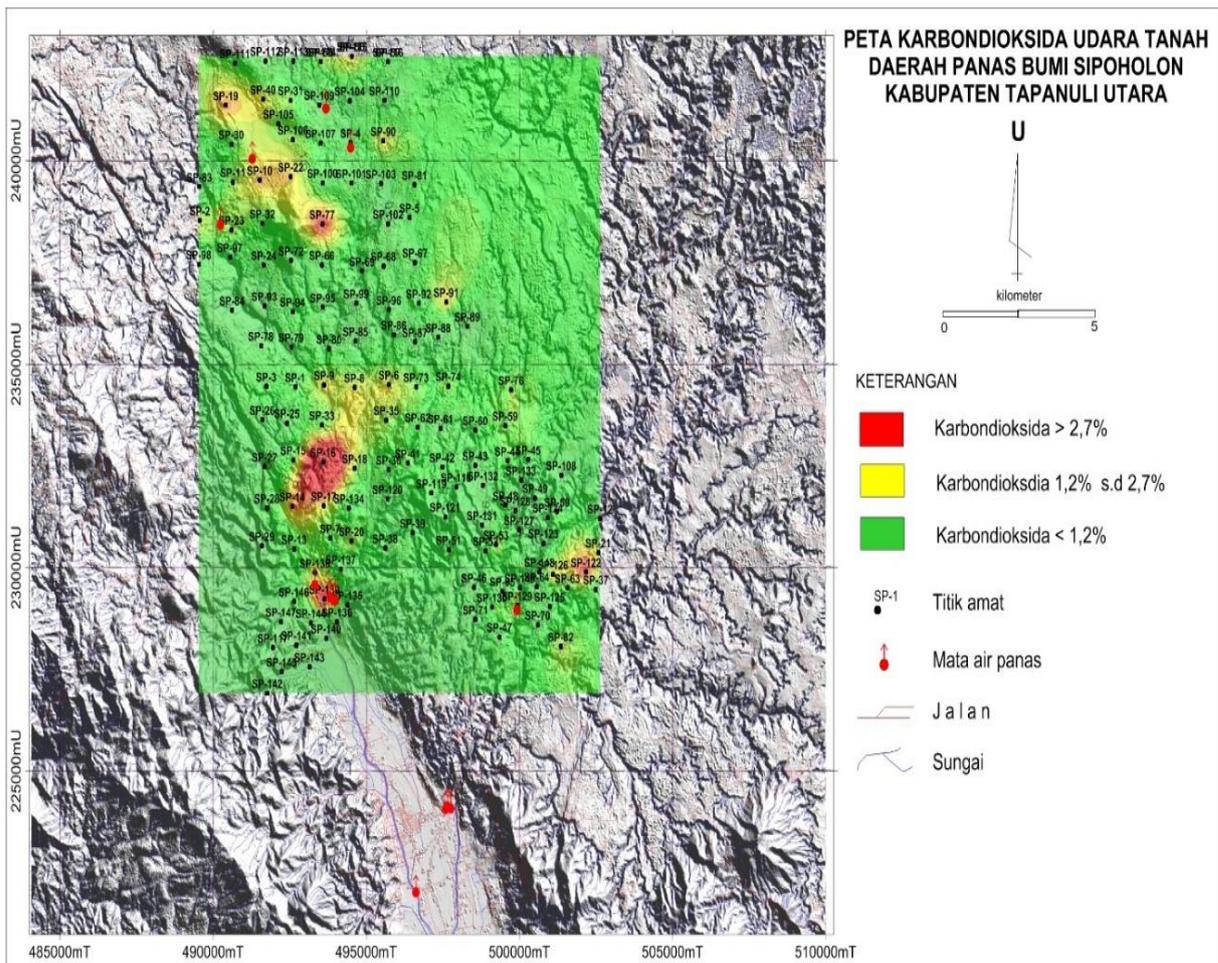
Gambar 13. Sebaran temperatur tanah pada kedalaman sekitar 1 meter di daerah Panas Bumi Sipoholon



Gambar 14 Sebaran konsentrasi merkuri dalam tanah di daerah Panas Bumi Sipoholon

Nilai konsentrasi senyawa gas karbondioksida (CO₂) yang terkandung dalam sampel udara tanah di Daerah Sipoholon berkisar antara 0,0% pada konsentrasi terendah dan 4,9% konsentrasi tertingginya. Variasi nilai konsentrasinya menghasilkan nilai rata-rata 1,2% dan standar deviasi sebesar 0,7%, sehingga nilai anomali tinggi senyawa CO₂ adalah di atas 2,7%. Konsentrasi CO₂ yang memiliki anomali tinggi distribusinya berada di area sekitar mata air panas Sipoholon dan air panas Leha, di bagian utara kelompok manifestasi Sipoholon, setempat-setempat di bagian barat Panabungan serta di

tenggara manifestasi Sibaragas di sekitar Bukit Imun. Anomali tinggi karbondioksida di sekitar air panas Sipoholon diduga berasosiasi dengan karbondioksida yang dihasilkan oleh fluida sistem panas bumi. Hal ini diduga berkaitan dengan hadirnya gas karbondioksida sebagai gas dominan dalam sampel bualan gas pada mata air panas Sipoholon dan hadirnya sinter travertin melimpah sebagai hasil lain dari konversi HCO₃ menjadi CO₂. Sementara konsentrasi tinggi karbondioksida di lokasi lainnya diduga berasosiasi dengan kondisi tanahnya yang relatif lembab ketika dilakukan pengambilan sampel gasnya.



Gambar 15. Distribusi konsentrasi gas karbondioksida udara tanah di daerah panas bumi Sipoholon

PEMBAHASAN

Meskipun secara geologinya berada pada zona Sesar Besar Sumatera, kehadiran manifestasinya memiliki perbedaan karakteristik yang mencolok antara manifestasi panas bumi kelompok air panas 1 dengan kelompok air panas 2. Kelompok air panas 1 yang hadir tepat pada blok sesarnya memiliki endapan sinter travertin sangat tebal, memiliki temperatur yang lebih tinggi, pH netral, dan memiliki debit yang lebih besar. Sementara kelompok air panas 2 yang berada di luar area blok sesarnya tidak memiliki endapan travertin, melainkan endapan oksida besinya lebih signifikan, juga memiliki temperatur lebih rendah, pH sedikit menuju asam dan debit yang lebih rendah. Jika memperhatikan karakteristik tersebut, diduga kelompok air panas 1 memiliki fluida panas yang berasal dari sumber yang lebih dalam pada temperatur yang lebih tinggi, sehingga interaksi antara fluida panas dengan batuan yang dilewatinya pun lebih intensif. Hal tersebut memberikan kontribusi bagi terjadinya proses pelarutan batuan bersusunan karbonatan yang diperkirakan sebagai batuan dasar di daerah ini. Ketika fluida panas muncul di permukaan, fluida panas yang mengandung larutan karbonatan kemudian membentuk endapan sinter karbonat (travertin) pada temperatur yang lebih rendah. Sedangkan air panas kelompok 2 karakteristik manifestasi panas buminya mencerminkan aliran air tanah dangkal

maupun air permukaan pada kedalaman yang lebih dangkal.

Karakteristik manifestasinya yang berupa mata air panas, setidaknya kelompok air panas 1 yang memiliki debit atau laju alir air panasnya besar dan mengalir cukup kencang, merupakan sistem fluida panas bumi bertekanan tinggi. Sedangkan kelompok air panas 2 yang ditandai dengan debit atau laju alir air panasnya yang cenderung lebih rendah dan agak menggenang, diperkirakan berhubungan dengan sistem fluida bertekanan sedang hingga rendah. Hadirnya bualan gas pada mata air panas kelompok 1 terlihat keluar dengan tekanan yang tinggi dan volume yang besar, sedangkan pada air panas kelompok 2 bualan gas yang keluar umumnya kecil bahkan bersifat tidak menerus. Kelompok air panas 1 yang berada tepat pada sesar permeabelnya memungkinkan bagi fluida termasuk gas untuk bergerak lebih mudah dan lebih cepat dibandingkan dengan fluida pada air panas kelompok 2 yang berada di luar zona *fault gouge*. Sistem panas bumi Sipoholon diduga memiliki reservoir satu fasa, yaitu cair. Dalam perjalanan menuju permukaan, fluida panas tersebut kemudian melepaskan gas saat mengalami *boiling* akibat perbedaan tekanan. Diperkirakan terjadi proses *boiling* yang mungkin berkaitan dengan proses yang terjadi selama migrasi fluida (*steam*) dari reservoir yang dalam. Proses *boiling* terjadi pada kedalaman yang jauh di bawah

permukaan. Sementara fluida panas pada kelompok 2 diduga merupakan hasil kondensasi fluida panas (*steam*) yang bermigrasi dari kedalaman bertemu dengan air permukaan sesaat sebelum hadir sebagai mata air panas. Fluida panas yang bekerja pada sistem panas bumi Sipoholon diperkirakan berasal dari reservoir bertemperatur dengan kisaran 117°C hingga 183°C berdasarkan analisis unsur terlarut metode geotermometer kuarsa konduktif (*no steam loss*). Asumsi yang digunakan dalam perhitungan geotermometer tersebut ialah manifestasi mata air panas mengalami proses *conductive cooling* dengan temperatur lebih rendah dari 100°C. Pendugaan temperatur tersebut mempertimbangkan keterbatasan kondisi fluida yang diperoleh, yaitu sampel fluida bertipe bikarbonat dan ber-pH netral, juga diperkirakan tidak mengalami kesetimbangan. Padahal pendugaan temperatur dengan geotermometer unsur terlarut idealnya dilakukan pada sampel fluida bertipe klorida dengan pH netral sebagai fluida hasil kesetimbangan, baik kesetimbangan sebagian maupun kesetimbangan seluruhnya.

Perkiraan area prospek panas bumi di Sipoholon adalah berasosiasi dengan area anomali konsentrasi tinggi temperatur dan gas karbondioksida di sekitar manifestasi panas bumi. Sebaran anomali temperature tinggi di sekitar mata air panas Sipoholon diperkirakan berhubungan

dengan kehadiran mata air panas dan tanah panasnya. Anomali tinggi karbondioksida di sekitar air panas Sipoholon diduga berasosiasi dengan karbondioksida yang dihasilkan oleh fluida sistem panas bumi. Hal ini diduga berkaitan dengan hadirnya gas karbondioksida sebagai gas dominan dalam sampel bualan gas pada mata air panas Sipoholon dan hadirnya sinter travertin melimpah sebagai hasil lain dari konversi HCO_3 menjadi CO_2

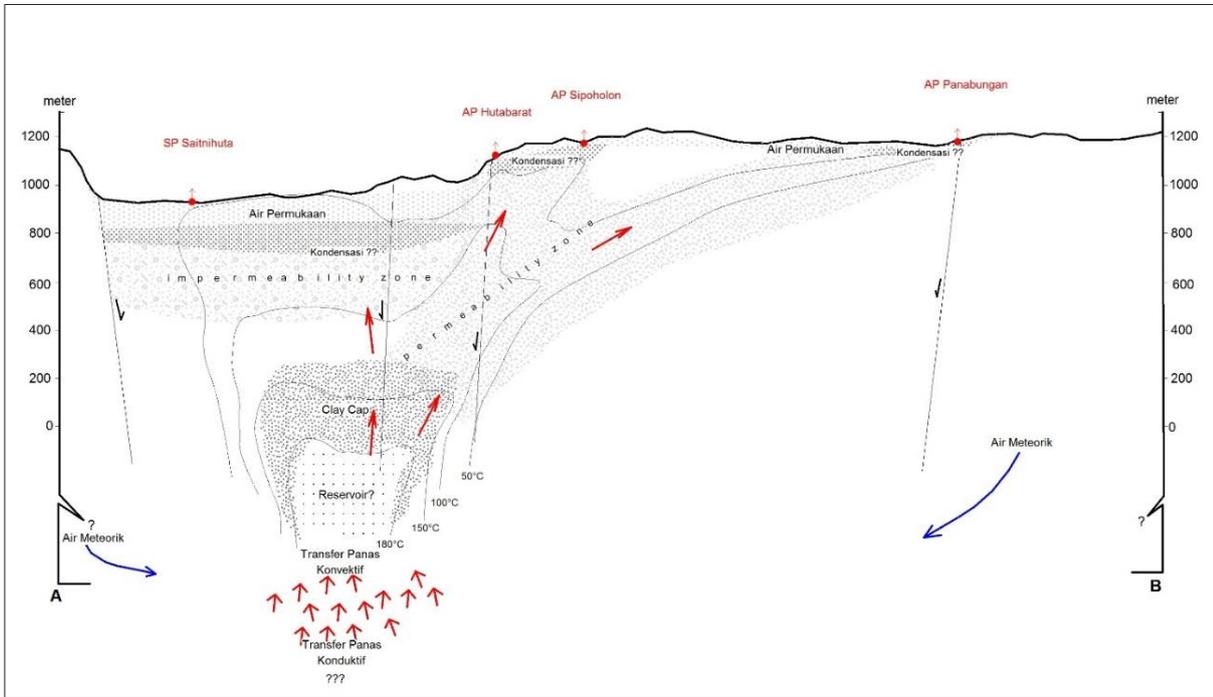
KESIMPULAN

Sistem panas bumi di Daerah Sipoholon diinterpretasikan sebagai sistem panas bumi yang dikontrol oleh struktur sesar (*fault controlled*). Kontrol Sesar Sumatera di daerah Sipoholon mengakibatkan manifestasi panas bumi yang hadir di permukaan memiliki 2 kelompok air panas dengan karakteristik yang berbeda.

Manifestasi yang berada tepat pada sesar permeabelnya, yaitu kelompok pertama, memiliki endapan sinter travertin sangat tebal, memiliki temperatur yang lebih tinggi, pH netral, dan memiliki debit yang lebih besar, serta mengeluarkan bualan gas bertekanan relatif tinggi dengan sedikit terdeteksi gas H_2S . Kelompok air panas 2 yang berada di luar area blok sesarnya tau di luar area sesar permeabelnya tidak memiliki endapan travertin, melainkan endapan oksida besi yang lebih signifikan, temperaturnya pun lebih rendah, pH sedikit menuju asam dan

debit yang lebih rendah, serta jarang mengeluarkan buangan gas hingga

mengeluarkan buangan gas yang lemah dan bersifat tidak menerus.



Gambar 16. Model konseptual geokimia panas bumi Daerah Sipoholon

DAFTAR PUSTAKA

- Giggenbach, W.F., 1988, *Geothermal Solute Equilibria Deviation of Na-K-Mg – Ca Geo-Indicators*, *Geochemica Acta* 52. pp. 2749 – 2765.
- Giggenbach, W.F dan Soto., 1992, *Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin*, *EPSL* 113, 495-5.
- Mutlu, H., & Güleç, N. (1998). *Hydrogeochemical outline of thermal waters and geothermometry applications in Anatolia (Turkey)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 495-515.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/ Heidelberg.
- Nukman, M. (2014). *Geothermal exploration involving structural geology and hydrochemistry in the Tarutung Basin, Northern Central Sumatra (Indonesia)* [Doctoral thesis, Technischen Universität Berlin].
- Tim Survei Terpadu. (2005). *Penyelidikan terpadu geologi, geokimia dan geofisika daerah panas bumi Sipoholon Siria-ria, Kab. Tapanuli Utara, Sumatera Utara*. Pusat Sumber Daya Geologi.

**SURVEI RINCI MAGNETOTELLURIK DAN *TIME DOMAIN ELECTROMAGNETIC*
DAERAH PANAS BUMI ADUM, KABUPATEN LEMBATA,
PROVINSI NUSA TENGGARA TIMUR**

Ratna Dewi dan Iqbal Takodama

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah Adum yang berada di kaki Gunung Ile Labalekang, Pulau Lembata, Provinsi Nusa Tenggara Timur memiliki manifestasi panas bumi berupa mata air panas dengan suhu 40 – 50°C. Survei MT dan TDEM dilakukan di daerah ini pada tahun 2023 untuk melengkapi data bawah permukaan hasil survei terpadu tahun 2002 yang masih sangat terbatas. Data geofisika yang diperoleh pada tahun 2002 hanya berupa data gaya berat, gaya magnet, dan gaya listrik yang belum dapat menggambarkan letak dan geometri reservoir panas bumi di daerah tersebut. Dengan menggunakan metode MT dan TDEM, diharapkan penetrasi kedalaman yang didapatkan menjadi lebih dalam sehingga dapat mencapai kedalaman reservoir panas bumi.

Pengukuran MT dan TDEM dilakukan pada 35 titik yang tersebar melingkupi mata air panas Adum, Bata, dan Boto. Sebaran titik pengukuran dibuat teratur dengan jarak antar titik sekitar 1.000 m. Hasil dari pemodelan MT menunjukkan adanya zona konduktif (<5 Ohm.m) yang diperkirakan berasosiasi dengan lapisan penudung yang berada di bawah dari mata air panas Boto mengarah ke Gunung Ile Labalekang. Di bagian selatan, zona konduktif ini dibatasi oleh Sesar Lamalewar. Di bagian selatan, zona konduktif ini masih terbuka ke arah puncak Gunung Ile Labalekang dikarenakan tidak adanya titik ukur. Dari interpretasi geologinya, batuan konduktif ini diperkirakan berupa batuan vulkanik kuartar. Zona konduktif ini terlihat pada elevasi 0 hingga -250 m. Di bawahnya terdapat zona tahanan jenis sedang (10 – 60 Ohm.m) yang diperkirakan berperan sebagai reservoir pada sistem panas bumi Boto. Zona ini diinterpretasikan berasosiasi dengan batuan Formasi Kiro. Sumber panas dari sistem panas bumi Boto diperkirakan berasosiasi dengan aktivitas vulkanisme dari Ile Labalekang.

Dari hasil kompilasi data MT dengan data-data geosains sebelumnya diperoleh luas area prospek P10, P50 dan P90 masing-masing sekitar 14 km², 8 km² dan 3 km². Adapun estimasi sumber daya panas buminya masing-masing sebesar 30 MWe, 20 MWe dan 11 MWe pada kelas cadangan mungkin.

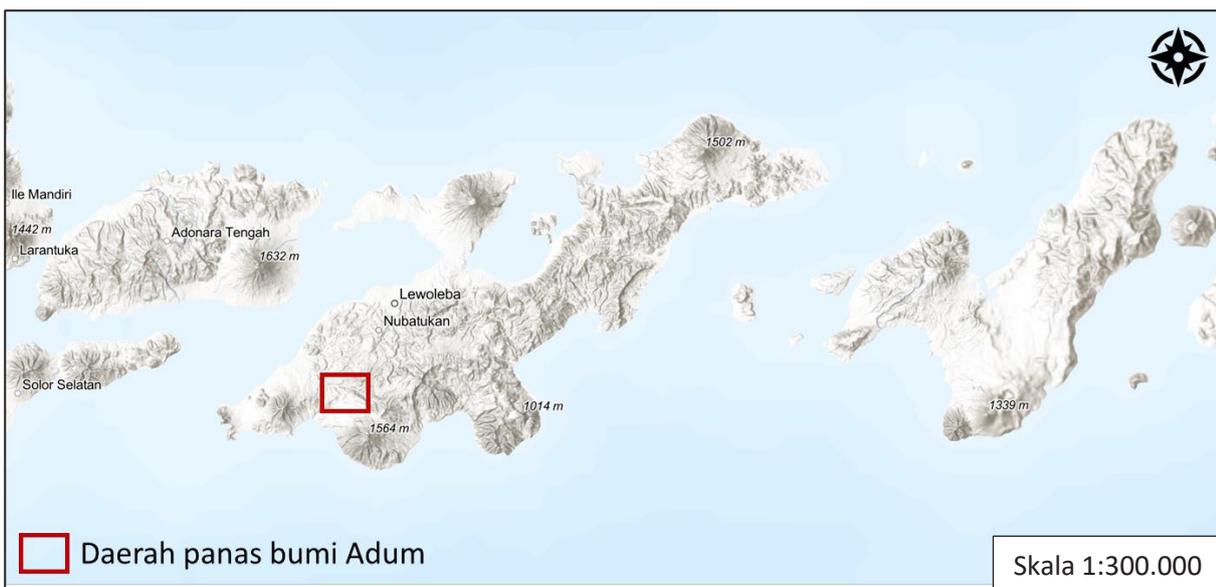
Kata kunci: Magnetotellurik, sistem panas bumi, Adum, Lembata, geofisika

PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Adum secara administratif terletak di Kecamatan Nagawutung, Kabupaten Lembata, Provinsi Nusa Tenggara Timur (**Gambar 1**). Dari hasil inventarisasi (Santoso, 1978), daerah ini memiliki manifestasi permukaan panas bumi berupa mata air panas yang terletak di Adum, Boto dan Bata dengan temperatur 38-51°C. Berdasarkan informasi ini, pada tahun 2002, Pusat Sumber Daya Geologi melakukan survei terpadu geologi, geokimia, dan geofisika yang meliputi gaya berat, geomagnet, dan geolistrik. Hasil survei geolistrik belum mampu menggambarkan keberadaan reservoir panas bumi di daerah ini karena hanya menggambarkan keadaan resistivitas bawah permukaan yang dangkal. Oleh karena itu, diperlukan adanya metode geofisika lain yang mempunyai penetrasi yang lebih dalam dan

dapat mendelineasi geometri reservoir sistem panas bumi.

Metode MT merupakan metode yang paling populer di dunia eksplorasi panas bumi karena dapat menggambarkan sebaran resistivitas bawah permukaan dengan baik. Resistivitas merupakan sifat fisik batuan yang memperlihatkan nilai kontras pada sistem panas bumi. Pada umumnya, batuan penutup pada sistem panas bumi mempunyai resistivitas yang rendah karena mengandung mineral lempung yang bersifat konduktif sebagai hasil ubahan batuan yang berinteraksi dengan fluida panas bumi. Pada bagian reservoir dengan temperatur yang lebih tinggi, mineral lempung batuan ubahan mempunyai sifat yang resistif. Kontras resistivitas inilah yang kemudian menjadi penanda keberadaan sistem panas bumi di daerah tersebut.



Gambar 1. Lokasi daerah survei

Survei MT dan TDEM yang dilakukan pada tahun 2023 dimaksudkan untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan melalui kontras resistivitas yang berkorelasi dengan sistem panas bumi di daerah survei. Adapun tujuannya adalah untuk memperoleh data keprospekan (letak, delineasi dan besarnya potensi) panas bumi dari tinjauan data geofisika. Data keprospekan ini kemudian akan dijadikan sebagai data pendukung bagi evaluasi keprospekan panas bumi di daerah ini.

METODOLOGI

Survei MT dan TDEM di daerah ini dilakukan pada 35 titik -pengukuran dengan jarak antar titik sebesar 1.000m. Sebaran titik ukur dibuat grid teratur yang melingkupi manifestasi mata air panas Adum, Bata, dan Boto. Survei MT dilakukan dengan menggunakan alat Phoenix MTU-5A, sedangkan survei TDEM menggunakan alat Zonge.

Perekaman data MT berupa *time series* dilakukan pada malam hari selama minimal delapan jam. Data yang didapatkan kemudian diolah menjadi kurva resistivitas semu terhadap frekuensi. Sebelum dilakukan proses pemodelan, dilakukan kontrol kualitas terhadap kurva-kurva tersebut sehingga mendapatkan kurva dengan pola yang terlihat jelas dan mempunyai *error bar* yang minim. Kurva-kurva yang sudah lolos kontrol kualitas kemudian dikoreksi menggunakan koreksi

statik untuk menghilangkan efek statis pada perambatan arus listrik di dekat permukaan tanah.

Pemodelan dilakukan secara 3 dimensi dengan menggunakan perangkat lunak WS3DINV (Siripunvaraporn, dkk, 2005). Pemodelan ini menggunakan metode *data space Occam*. Jumlah *sampling* frekuensi yang digunakan sebanyak 12 frekuensi per dekade dari 0,044-97 Hz. Ukuran *grid cell* model dibuat menjadi 200 m x 200 m sebanyak 36 x 26 blok. *Grid cell* ini kemudian dirotasi sebesar 50° untuk menyesuaikan dengan distribusi titik MT.

GEOLOGI REGIONAL

Menurut Bemmelen (1949), Pulau Lembata termasuk dalam busur gunung api Banda dengan struktur geologi berupa lipatan dan sesar berarah timur laut – barat daya dan barat laut – tenggara. Daerah survei terdiri dari dua satuan morfologi, yaitu satuan morfologi pegunungan dan dataran. Satuan morfologi pegunungan dicirikan dengan kerucut gunung api Ile Labalekang di bagian tenggara, Ile Mingar di bagian barat daya dan Ile Ujulewung di bagian utara. Satuan morfologi dataran pada umumnya terdapat di sepanjang pantai barat Pulau Lembata yang ditutupi oleh batugamping koral.

Menurut Koesoemadinata, dkk (1989), batuan dasar di daerah survei merupakan Formasi Kiro (Tmk) yang berupa batuan gunung api yang sebagian

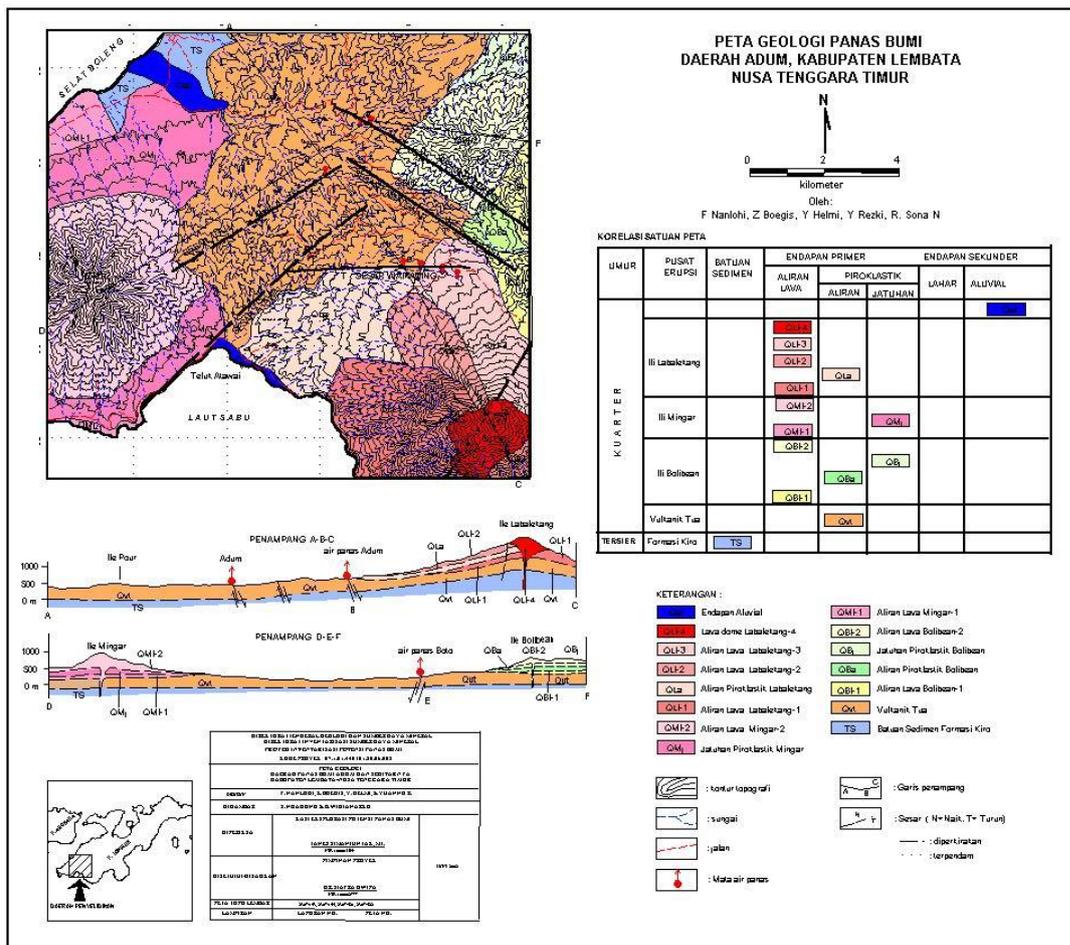
telah diendapkan di laut dangkal. Formasi ini tertutup oleh batuan gunung api muda hasil dari aktivitas Ile Mingar (QTvm) dan Ile Labalekang (QTvb) yang terdiri dari lava, breksi, anglomerat, tufa, pasir gunung api, dan tufa pasiran gampingan.

Dari hasil survei terpadu 2002, stratigrafi di daerah survei dikelompokkan menjadi 15 satuan batuan (**Gambar 2**) dengan urutan dari tua ke muda yaitu:

- batuan Formasi Kiro (Tmk)
- vulkanik tua (Qvt)
- aliran lava G. Ile Bolibean-1 (QBI-1)
- aliran piroklastik G. Ile Bolibean (QBa)
- jatuhnya piroklastik G. Ile Bolibean (QBJ)

- aliran lava G. Ile Bolibean-2 (QBI-2)
- aliran lava G. Ile Mingar-1 (QMI-1)
- jatuhnya piroklastik G. Ile Mingar (QMj)
- aliran lava G. Ile Mingar-2 (QMI-2)
- aliran lava G. Ile Labalekang-1 (QLI-1)
- aliran piroklastik G. Ile Labalekang (QLa)
- aliran lava G. Ile Labalekang-2 (QLI-2)
- aliran lava G. Ile Labalekang-3 (QLI-3)
- aliran lava G. Ile Labalekang-4 (QLI-4)
- endapan alluvial (Qal).

Adapun struktur yang teridentifikasi berupa sesar normal Atawai, Adum, Waikating, Lamalewar, Bolibean dan Labalekang.



Gambar 2. Peta geologi daerah panas bumi Adum (Anonim, 2002)

HASIL

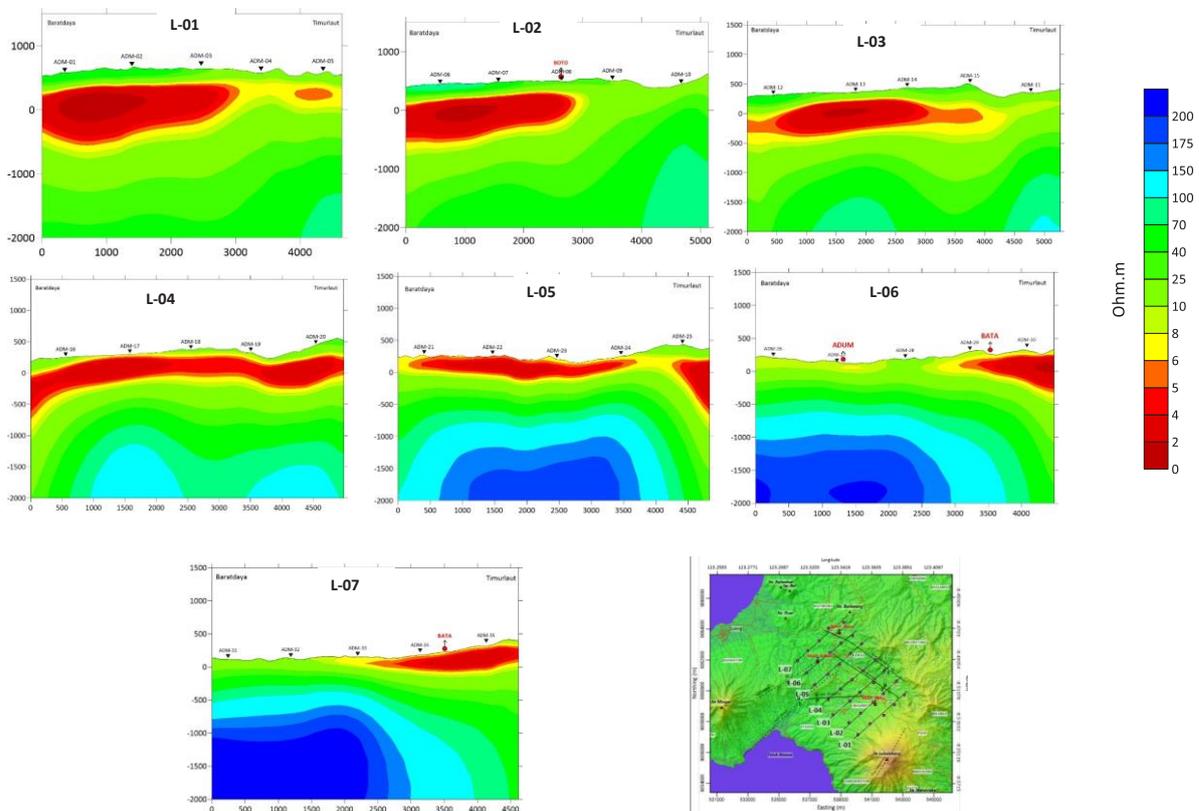
Hasil pemodelan 3 dimensi ditampilkan dalam bentuk penampang berarah barat daya – timur laut dan barat laut – tenggara, serta peta sebaran tahanan jenis per kedalaman.

1. Penampang Tahanan Jenis

Penampang tahanan jenis berarah barat daya – timur laut ditunjukkan pada Gambar 3. Pola tahanan jenis pada semua penampang (L01 – L07) menunjukkan pola yang relatif seragam. Zona konduktif (<5 Ohm.m) terlihat di semua lintasan yang dengan kedalaman dan ketebalan yang bervariasi. Pada penampang L01 dan L02, zona konduktif terlihat di sebelah barat daya dengan ketebalan mencapai 1.000 m pada kedalaman sekitar 200 m. Pada

penampang L02, ujung dari zona konduktif ini berada di bawah mata air panas Boto, Pada penampang L03-L05, zona konduktif terlihat bergerak ke tengah hingga ke timur laut yang semakin menipis dan mendangkal. Pada penampang L06-L07, zona konduktif hanya terlihat di ujung timur laut lintasan di dekat permukaan.

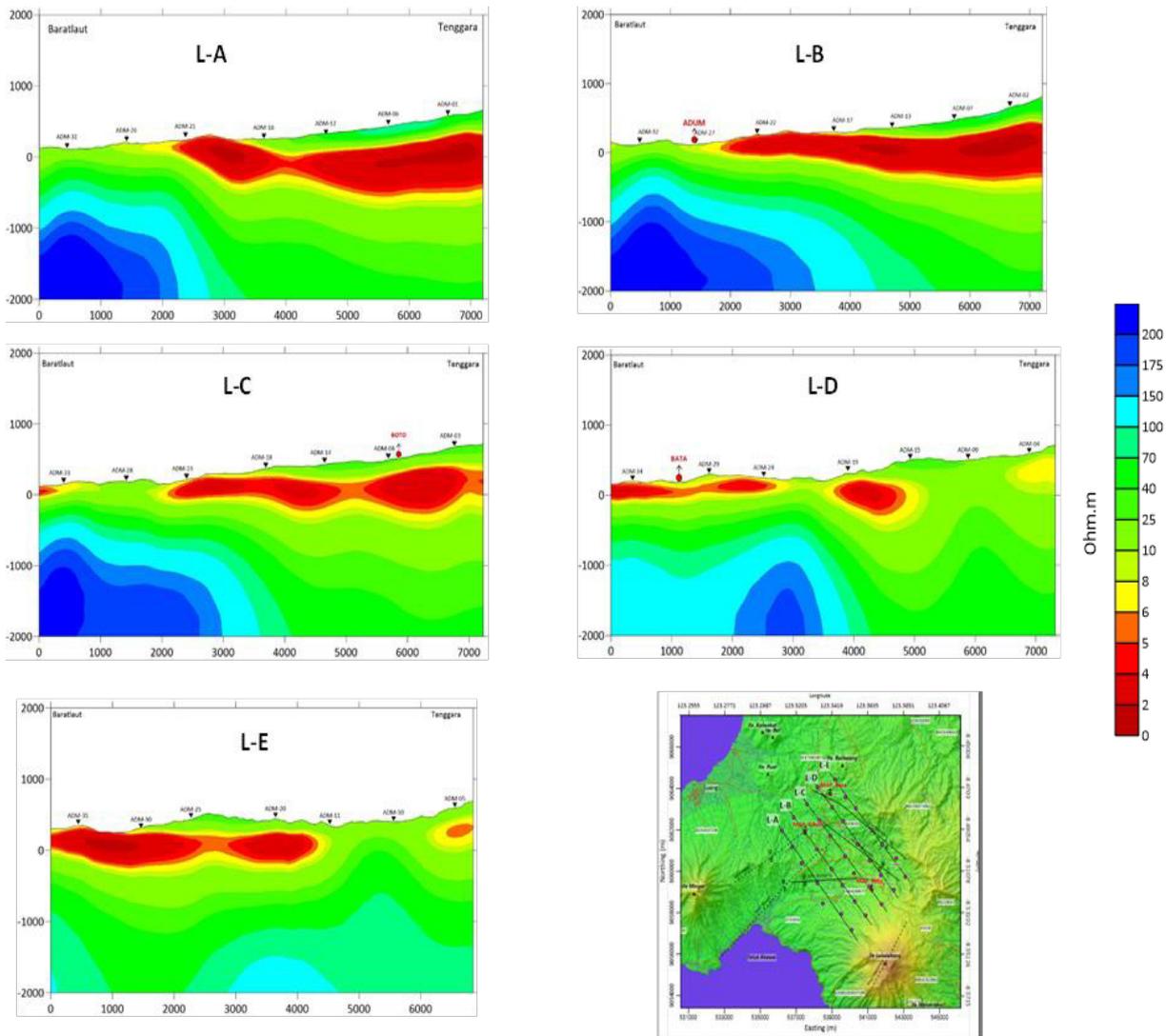
Zona resistif (>100 Ohm.m) mulai terlihat dari penampang L04-L07 mulai dari kedalaman 500 – 1.000 m. Pada penampang L04, zona resistif terlihat samar. Pada penampang L05, zona resistif berada di tengah lintasan dan cukup terlihat masif. Pada penampang L06 dan L07, zona resistif berada bagian di barat laut dari penampang.



Gambar 3. Penampang tahanan jenis berarah barat daya – timur laut daerah panas bumi Adum

Penampang tahanan jenis berarah barat laut – tenggara ditunjukkan pada Gambar 4. Pola tahanan jenis pada penampang LA-LC terlihat mirip, di mana zona konduktif yang terlihat memanjang dari tenggara dengan kedalaman sekitar 300 m dan kemudian muncul ke permukaan di tengah lintasan. Zona resistif muncul di ujung barat laut penampang hingga ke tengah lintasan dengan kedalaman sekitar 700 m. Pada lintasan LD dan LE, zona konduktif muncul di bagian

barat laut hingga ke tengah lintasan dekat ke permukaan. Namun pola rendah ini terbelah oleh zona tahanan jenis sedang di dekat sisi bagian tenggara. Pola resistif pada model L-D berada di area dalam di sisi bagian barat laut dan di bawah mata air panas Bata. Sedangkan untuk model L-E relatif berada di sisi barat laut hingga tenggara pada bagian yang dalam. Meskipun nilai tahanan jenisnya relatif lebih rendah dibandingkan pola resistif pada model L-D.



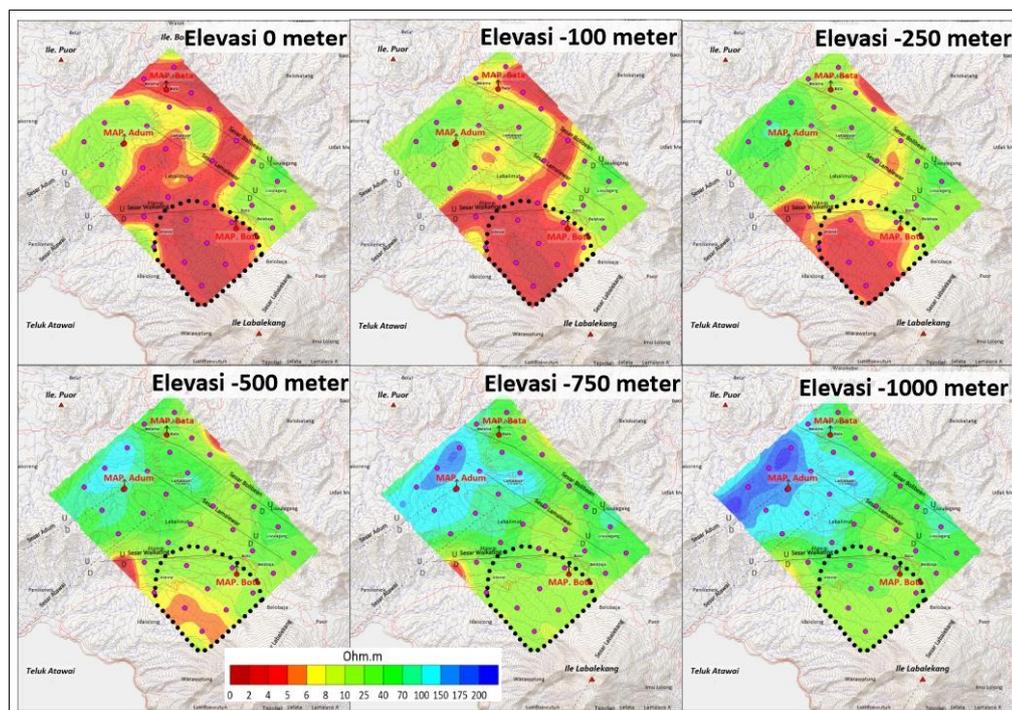
Gambar 4. Penampang tahanan jenis berarah barat laut – tenggara daerah panas bumi Adum

2. Peta Sebaran Tahanan Jenis

Distribusi tahanan jenis secara lateral ditampilkan dalam berbagai elevasi (elevasi 0 m, -250 m, -500 m, -750 m, -1000 m) yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Pada elevasi 0 m, secara umum didominasi oleh zona konduktif yang hampir melingkupi semua area kecuali area kecil di sisi tenggara dan barat laut yang relatif bertahanan jenis sedang (10 – 60 Ohm.m). Pada elevasi -250 m dan elevasi -500 m, zona konduktif berada di sisi selatan dan melidah relatif ke arah timurlaut. Di sisi area barat laut mulai diisi oleh zona resistif begitu pula di sisi tenggara. Pada elevasi di bawahnya (elevasi – 750 m dan -1000 m) pola tahanan jenis tinggi semakin meluas di sisi barat laut, sedangkan pola rendah di sisi selatan semakin mengecil dan nilai tahanan jenisnya relatif bertambah.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pemodelan 3 dimensi data MT, zona konduktif yang terlihat di dekat permukaan pada penampang dan juga peta tahanan jenis diinterpretasikan sebagai lapisan penutup dari sistem panas bumi di daerah Adum. Pada elevasi 0, sebaran zona konduktif menyebar dari Gunung Ile Labalekang hingga ke mata air panas Adum dan Boto. Semakin ke dalam, zona konduktif semakin menyempit dan berubah menjadi zona resistivitas medium (5-100 Ohm.m) di kedalaman. Zona resistivitas medium yang berasosiasi dengan reservoir sistem panas bumi di daerah ini berada di sekitar Gunung Ile Labalekang yang muncul mulai di elevasi -300 m.



Gambar 5. Peta sebaran tahanan jenis per kedalaman daerah panas bumi Adum

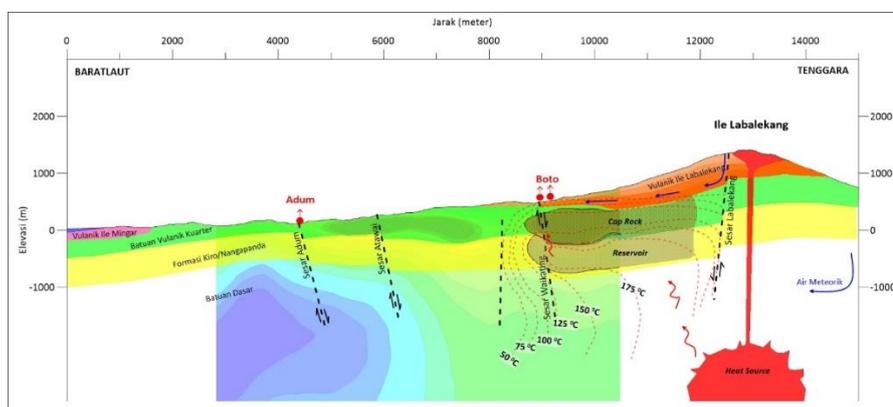
Di sekitar mata air panas Adum, tidak terdapat batuan yang memiliki tahanan jenis rendah. Zona konduktif ini diperkirakan dibatasi oleh suatu struktur sesar berupa sesar normal Atawai. Di dekat sesar Atawai juga terdapat kontras tahanan jenis yang terlihat dalam model MT, tetapi kontras ini tidak terlihat di permukaan. Hal ini diduga terdapat struktur di bagian dalam yang tergambarkan oleh model MT.

Zona konduktif di sekitar mata air panas Boto memanjang ke bagian timurlaut pada sisi utara dari mata air panas Boto dan dibatasi oleh sesar Lamalewar. Di bagian baratdaya, selatan, hingga tenggara, zona konduktif masih terbuka ke arah Gunung Ile Labalekang, Bukan zona konduktif ini dikarenakan belum adanya data MT di daerah tersebut.

Berdasarkan hasil analisis geokimia (Anonim, 2002), ketiga mata air panas di daerah survei berasal dari reservoir yang berbeda. Hal ini didukung juga dengan adanya keberadaan sesar yang memisahkan sistem panas bumi pada setiap mata air panas. Namun diperlukan

data dan analisis yang lebih menyeluruh lagi untuk menentukan hubungan dari ketiga mata air panas ini.

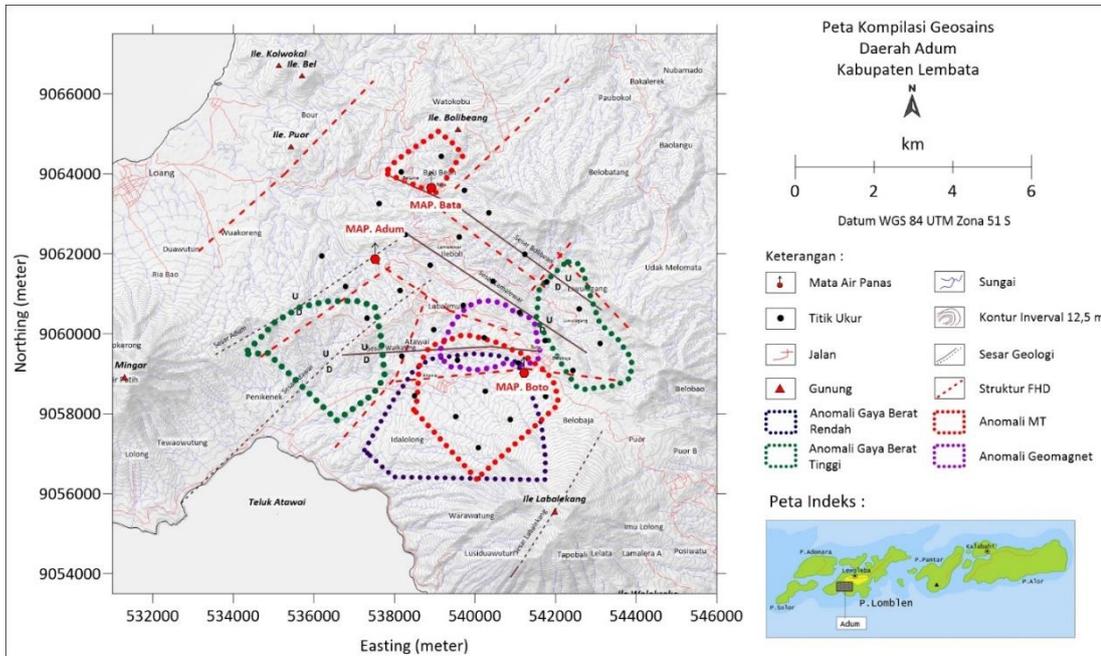
Dari ketiga kemungkinan sistem panas bumi, sistem panas bumi Botolah yang paling terlihat dari survei ini. Sistem panas bumi Boto dimodelkan pada Gambar 6. Model ini mengacu kepada data MT serta data geologi dan geokimia (Anonim, 2002). Sumber panas diperkirakan berasal dari Gunung Ile Labalekang. Reservoir sistem digambarkan pada zona resistivitas sedang yang muncul pada kedalaman 600 – 800 m dari permukaan. Batuan reservoir diperkirakan berupa batuan dari Formasi Kiro. Zona konduktif di atasnya diperkirakan sebagai lapisan penudung dari sistem panas bumi Boto yang berupa batuan vulkanik kuartar yang terubahkan. Namun, batas dari reservoir dan lapisan penudung ini belum jelas karena masih membuka ke arah Gunung Ile Labalekang. Estimasi penghitungan geotermometer di daerah ini sekitar 170 – 210 °C (Anonim, 2002)



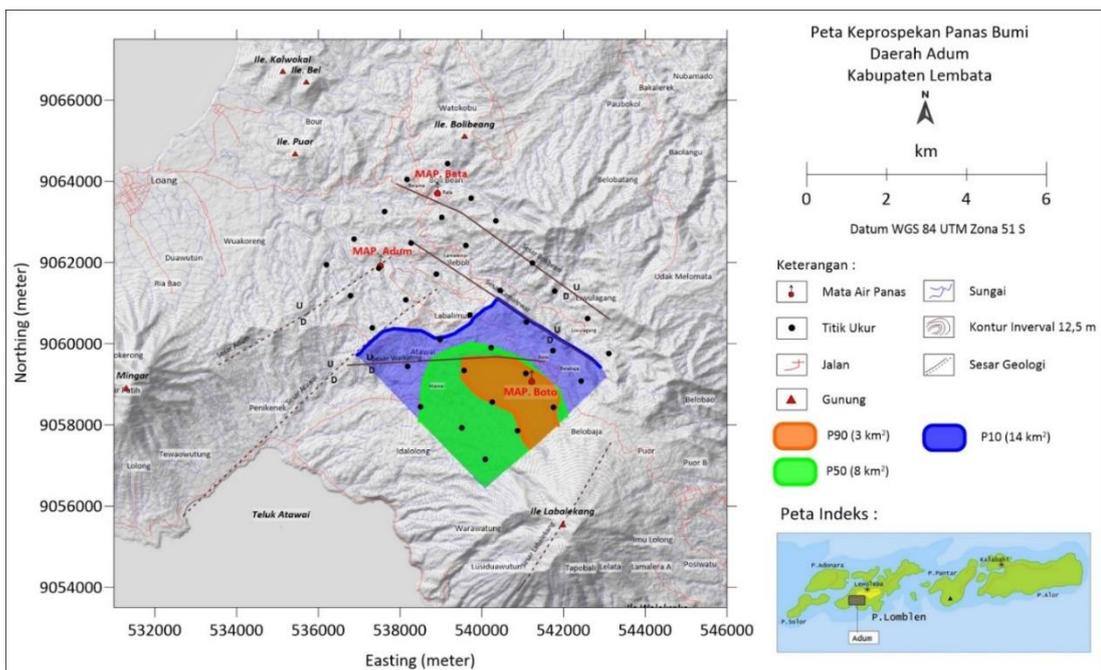
Gambar 6. Model konseptual sistem panas bumi Boto di daerah Adum

Estimasi luasan zona prospek di daerah Adum diperoleh dengan mengintegrasikan data-data dari survei MT dan survei terpadu geologi, geokimia, dan gefisika tahun 2002. Peta kompilasi dan

zona prospek ditampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Luas zona prospek yang didapatkan dari kompilasi ini adalah 14 km² untuk P10, 8 km² untuk P50, dan 3 km² untuk P90.



Gambar 7. Peta kompilasi zona prospek daerah Adum

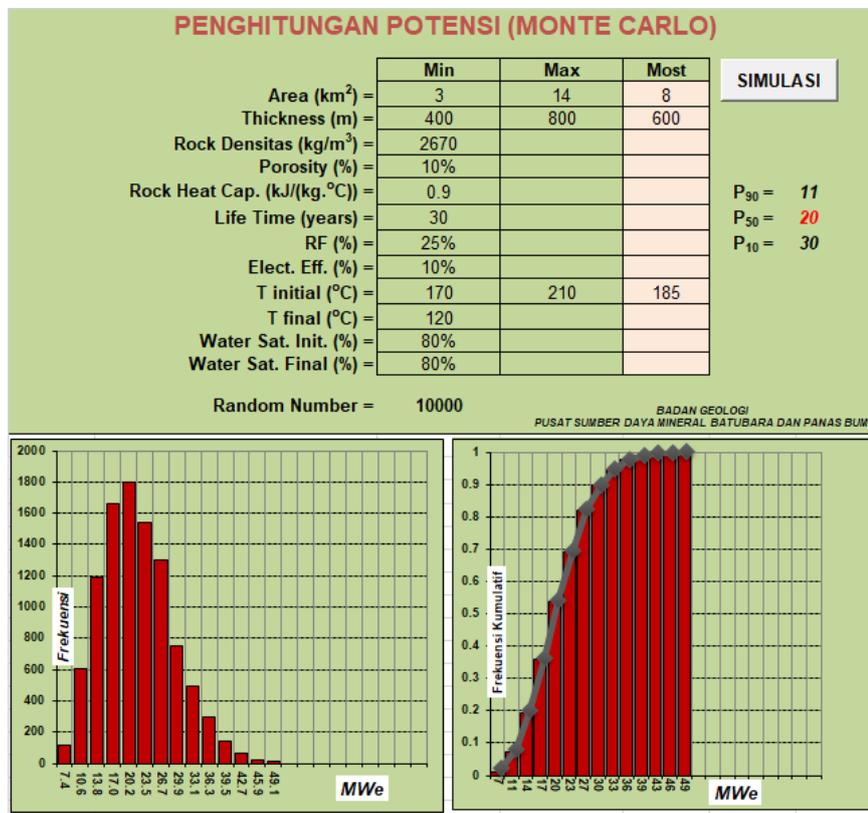


Gambar 8. Peta zona prospek daerah Adum

Perhitungan sumber daya dilakukan dengan metode volumetrik dengan simulasi Monte Carlo berdasarkan SNI 6169:2018 tentang metode estimasi potensi panas bumi. Parameter yang digunakan dalam perhitungan dan besarnya sumber daya ditampilkan pada Gambar 9. Temperatur reservoir berdasarkan hasil survei terpadu geologi, geokimia, dan geofisika (Anonim, 2002) adalah 170°C (P90), 185°C (P50) dan 210°C (P10) dengan temperatur akhirnya 120°C. Ketebalan reservoir didasarkan pada hasil pemodelan magnetotellurik (MT) dengan ketebalan 400 m, 600 m dan 800 m untuk penghitungan P90, P50 dan P10. Densitas batuan yang digunakan menggunakan asumsi nilai densitas 2.670

kg/m³ berdasarkan asumsi rata-rata densitas batuan.

Selama pemanfaatan dalam waktu tertentu, ada kemungkinan untuk terjadinya perubahan saturasi air dalam reservoir yang diasumsikan dari keadaan awal 80% menjadi 80%. Batuan reservoirnya dianggap memiliki porositas sebesar 10%, kapasitas panas batuan reservoir Cp (rock) 900 J/kg°C. Faktor perolehan (Rf) 25% dan faktor konversi dari thermal ke listrik adalah 10%. Waktu pemanfaatan di asumsikan selama 30 tahun. Perhitungan sumber daya panas bumi menghasilkan sumber daya sebesar 20 MWe (P50), 11 MWe (P90) dan 30 MWe (P10) pada kelas cadangan mungkin.



Gambar 9. Perhitungan sumber daya daerah Adum

KESIMPULAN DAN SARAN

Terdapat 3 kelompok mata air panas di daerah Adum, yang juga mengindikasikan kemungkinan ada 3 sistem panas bumi yang terpisah. Berdasarkan data MT yang ada, sistem panas bumi Boto dicirikan oleh adanya zona konduktif yang berfungsi sebagai batuan penudung yang merupakan batuan vulkanik tua yang telah mengalami ubahan. Sedangkan reservoir dicirikan oleh zona resistivitas sedang yang diperkirakan merupakan batuan formasi Kiro/Nangapanda. Reservoir ini diperkirakan muncul pada kedalaman 600 – 800 meter. Sistem ini kemungkinan masih membuka ke arah Gunung Ile Labalekang (selatan/tenggara).

Luas area prospek pada sistem panas bumi Boto sekitar 8 km² dengan estimasi penghitungan sumber daya panas bumi sebesar 20 MWe pada kelas cadangan mungkin.

Hasil survei MT masih belum dapat mendelineasi batas sistem panas bumi Boto karena masih membuka ke arah Gunung Ile Labalekang. Oleh karena itu, diperlukan adanya survei tambahan untuk menentukan batas sistem panas bumi Boto. Selain itu, perlu juga adanya tambahan informasi mengenai sistem panas bumi Adum dan Bata sehingga dapat diketahui keterkaitannya satu sama lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2002). *Laporan Akhir Survei Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Adum, Kabupaten Lembata, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.
- Bemmelen, V. R. (1949). *The Geology of Indonesia*. Netherlands: The Hague Vol I.A.
- Koesoemadinata, S., & Noya, N. (1989). *Peta Geologi Lembar Lomblen, Nusa Tenggara Timur*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Santoso, M. (1978). *Inventarisasi Kenampakan Panas Bumi di Sekitar Flores Timur, P. Lomblen, P. Adonara dan P. Solor*. Bandung.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., & Uyeshima, M. (2005). Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method. *Physics of The Earth And Planetary Interiors*, 3-14.

SURVEI RINCI GAYA BERAT DAERAH PANAS BUMI BORA PULU KABUPATEN SIGI PROVINSI SULAWESI TENGAH

Iqbal Takodama, Ahmad Zarkasyi, dan Erawan Melisano

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Bora – Pulu merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi dan menjadi prioritas dalam rangka percepatan pengembangan panas bumi di Indonesia. Pada tahun 2023 dilakukan penambahan data gaya berat sebanyak 183 titik dengan sebaran mengisi area-area kosong yang belum terdapat titik ukur. Pengolahan data sebanyak 729 titik dilakukan dengan mengombinasikan data tahun 2003, 2010 dan data terbaru tahun 2023.

Anomali gaya berat di daerah survei didominasi oleh anomali rendah yang diperkirakan sebagai respon dari alluvium di area pedataran. Sedangkan anomali relatif tinggi yang diinterpretasikan sebagai respons dari granit, sekis dan filit, berada di sekitar perbukitan bagian barat, timur dan juga selatan area survei.

Dari analisis struktur FHD, terlihat keberadaan struktur dominan berarah relatif utara – selatan berada di sisi barat dan sisi timur. Di sisi barat area survei juga terdapat struktur-struktur minor yang berarah baratdaya-timurlaut. Sedangkan di sisi timur, struktur-struktur minor terlihat berarah baratdaya-timurlaut dan baratlaut-tenggara. Berdasarkan model data gaya berat, batuan sekis merupakan batuan tertua yang diperkirakan berumur pra-tersier. Batuan filit berumur pra-tersier berada di bagian selatan. Batuan lebih muda adalah batuan granit berumur tersier yang muncul di sisi barat dan timurlaut area survei. Area pedataran yang berada di bagian tengah diisi oleh kolovium dan alluvium.

Kata kunci : Bora – Pulu, Panas Bumi, Gaya Berat, Anomali Bouguer, Struktur

PENDAHULUAN

Daerah Bora-Pulu merupakan salah satu daerah panas bumi yang memiliki potensi untuk dilakukan percepatan pengembangan melalui kegiatan eksplorasi oleh pemerintah. Salah satu bentuk kegiatan yang dilakukan

adalah survei rinci penambahan data gaya berat

Maksud dan tujuan dari survei ini adalah untuk memperoleh informasi struktur bawah permukaan berdasarkan sebaran densitas batuan yang berkorelasi dengan sistem panas bumi di daerah Bora-Pulu.

Lokasi daerah panas bumi Bora-Pulu secara administratif berada di wilayah Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis berada pada koordinat $119^{\circ}49'8,1''$ - $120^{\circ}0'14,7''$ BT dan $0^{\circ}55'15,3''$ - $1^{\circ}18'27,5''$ LS atau 813719 - 834391 mE dan 9854674 - 9898069 mT dalam sistem Universal Transverse Mercator, Zona 50 Bagian Selatan (Gambar 1).

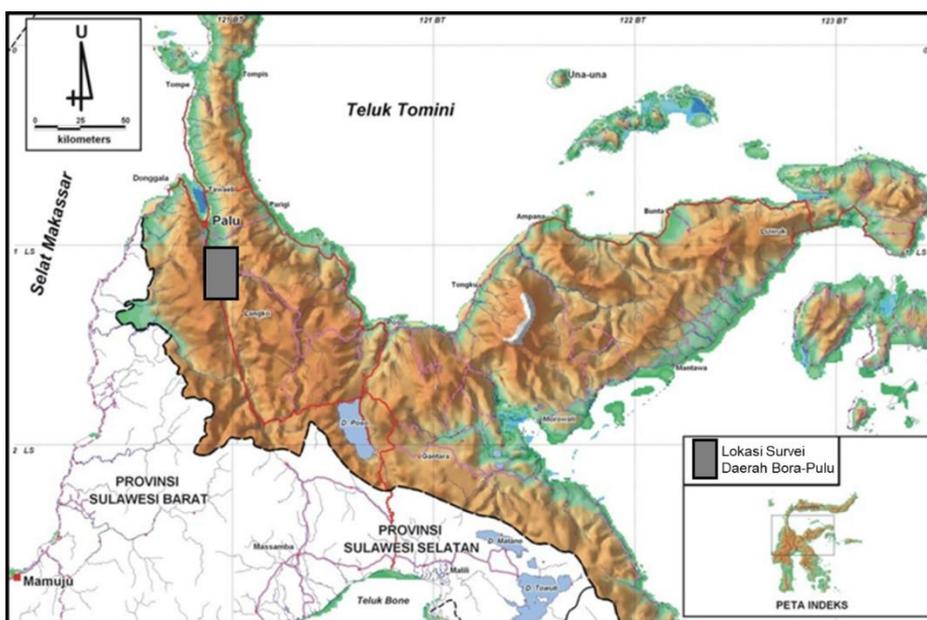
Beberapa penyelidikan yang telah dilakukan oleh Pusat Sumber Daya Geologi (sekarang PSDMBP), diantaranya survei terpadu daerah Pulu (2003), survei terpadu daerah Bora (2010) dan survei magnetotelurik (MT) pada tahun 2010.

METODOLOGI

Metode gaya berat merupakan metode geofisika yang didasarkan pada pengukuran medan gravitasi bumi. Komponen utama yang diamati adalah variasi medan gravitasi akibat variasi rapat

massa batuan di bawah permukaan. Hal yang diselidiki dalam metode ini adalah perbedaan medan gravitasi dari satu titik observasi terhadap titik observasi lainnya.

Semua data hasil pengukuran yang diperoleh di lapangan langsung dilakukan pengolahan awal dan koreksi standar di lapangan. Koreksi yang awal dilakukan oleh koreksi pasang surut (*tidal*) dan koreksi *drift*. Kedua koreksi ini bergantung terhadap waktu pengukuran. Dari hasil koreksi ini diperoleh nilai gaya berat observasi pada masing-masing titik pengukuran. Koreksi selanjutnya adalah koreksi-koreksi yang bergantung kepada topografi lapangan. Koreksi-koreksi tersebut diantaranya koreksi lintang, koreksi udara bebas (FAC), koreksi Bouguer dan koreksi medan (*terrain*). Dari hasil koreksi ini diperoleh nilai anomali Bouguer pada masing-masing titik pengukuran.



Gambar 1. Lokasi daerah panas bumi Bora-Pulu, Sulawesi Tengah

Anomali Bouguer yang diperoleh di merupakan penjumlahan (superposisi) dari berbagai macam sumber dan kedalaman anomali di bawah permukaan. Dari berbagai sumber tersebut, salah satunya merupakan *target event* untuk dipisahkan, baik yang berada di zona dangkal (residual) ataupun zona dalam (regional). Ada beberapa metode pemisahan anomali residual dengan regional, seperti metode perata-rataan bergerak (*moving average*), *trend surface analysis* dan kontinuitas ke atas.

Analisis struktur gaya berat dilakukan dengan metode analisis *First Horizontal Derivative* (FHD). Analisis derivatif horizontal pertama merupakan suatu analisis terhadap data gaya berat untuk mendapatkan pola kelurusannya. Peta anomali *horizontal derivative* bisa dianalisis dari peta anomali Bouguer maupun peta anomali residual. Gradien horizontal dari anomali gaya berat akan teramati pada bidang batasnya (Blakely, 1995). Gradien ini biasanya disebabkan oleh suatu tubuh batuan yang berada di bawah permukaan. Gradien ini cenderung lebih tahan terhadap *noise*, karena memerlukan perhitungan dari 2 (dua) arah turunan horizontal orde pertama.

GEOLOGI REGIONAL

Secara umum, Sulawesi Tengah terletak di pertemuan tiga lempeng utama (*triple junction*), yaitu Lempeng Pasifik di sebelah timur, Lempeng Eurasia di utara

dan Lempeng Indo-Australia di selatan. Fenomena geologi yang berperan penting di daerah ini adalah Sesar Palu-Koro yang memiliki arah utara-selatan dan sampai saat ini masih aktif dengan pergerakan arah mengiri (*sinistral*).

Berdasarkan Sumadirdja tahun 1973, daerah Bora termasuk ke dalam Mandala Sulawesi Barat dan terpisah dengan Mandala Sulawesi Timur oleh Sesar Poso yang masuk kedalam kawasan Zona Sesar Palu – Koro. Mandala Sulawesi Barat dicirikan oleh batuan terobosan yang berumur Miosen - Pliosen. Tektonik Paleosen yang mempengaruhi daerah survei pada Formasi Latimojong yang termalihkan secara regional pada derajat rendah, kemudian tektonik pada Kala akhir Miosen Tengah disertai dengan adanya terobosan batolit granit yang menerobos semua batuan yang lebih tua. Tektonik terakhir pada daerah ini diperkirakan pada Kala Pliosen yang membentuk Formasi Pakuli (Gambar 2).

Kompleks Wana (TRw) dan Kompleks Gumbasa (TRjgg) yang menempati area tengah sampai selatan daerah kerja dan merupakan batuan tertua di daerah ini yang berumur Trias – Jura. Kompleks batuan malihan (Km) yang berjenis sekis mika, sekis amfibol, gneiss dan pualam, berumur Kapur menempati sedikit bagian sebelah utara dari daerah survei yang diikuti oleh Formasi Latimojong yang terdiri dari batupasir malih dengan batu sabak dan filit (Kls) yang menempati

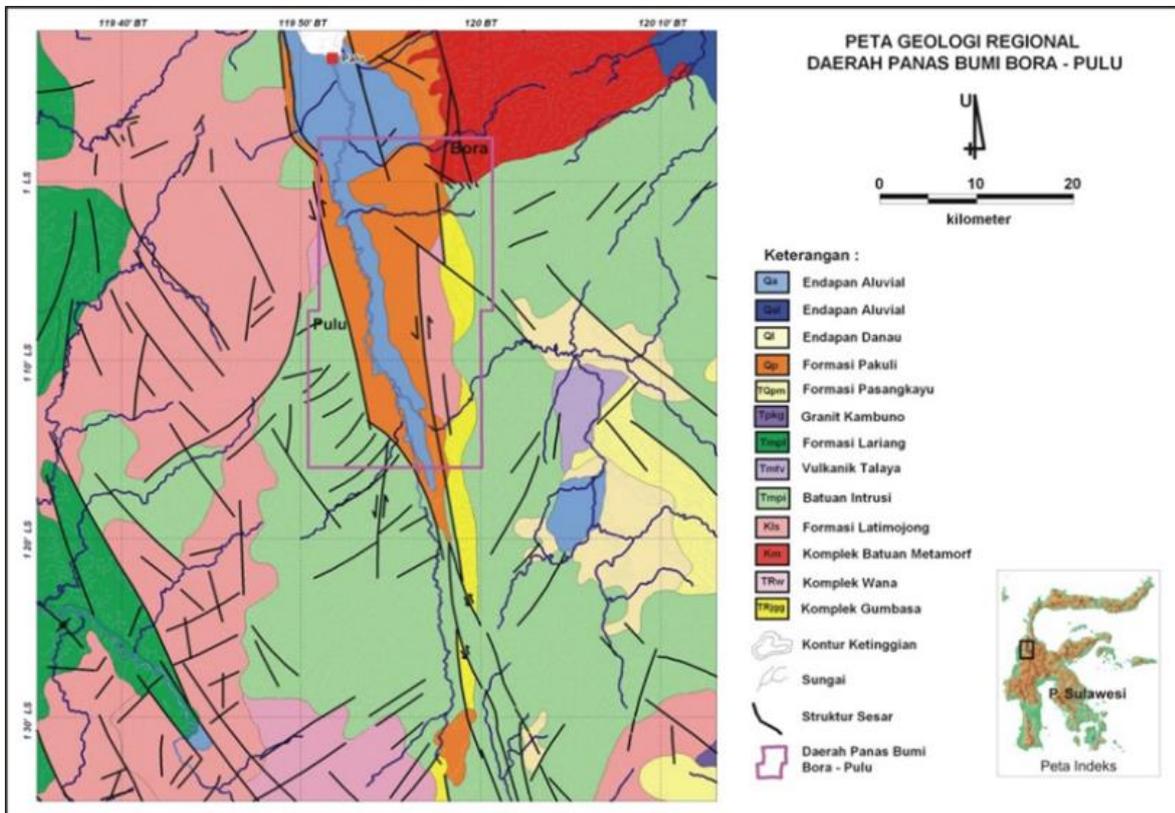
sebelah selatan daerah survei yang berumur Kapur Akhir. Batuan terobosan (Tmpi) yang terdiri dari diorit, andesit, granit, granodiorit menempati bagian timur dari daerah survei dan berumur Miosen Tengah. Formasi Pakuli (Qp) yang terdiri dari konglomerat dan batupasir, setempat batulempung karbonan menempati daerah yang paling luas yaitu bagian barat dari daerah survei di mana formasi ini berumur Pleistosen Akhir – Holosen Awal, selanjutnya adalah endapan permukaan (Qa) yang berumur Resen (Simanjatak dkk, 1997).

HASIL PENYELIDIKAN

Data yang diperoleh di tahun 2023 sebanyak 183 titik dengan sebaran mengisi

area-area kosong yang belum terdapat data gaya berat. Pengolahan data dilakukan dengan mengikat data tahun 2023 ini ke data gaya berat tahun 2010 di daerah Bora. Jumlah data gaya berat tahun 2023 dengan data gaya berat tahun 2003 dan 2010 sebanyak 729 data (Gambar 3).

Nilai densitas diperlukan dalam pengolahan data untuk menghitung nilai anomali Bouguer. Nilai densitas pada daerah ini didasarkan oleh hasil analisis densitas conto batuan yang diperoleh di lapangan dengan total 18 buah conto batuan. Dari hasil pengukuran densitas conto batuan di laboratorium, diperoleh nilai rata-rata densitas batuan di daerah Bora – Pulu sekitar $2,78 \text{ gr/cm}^3$.

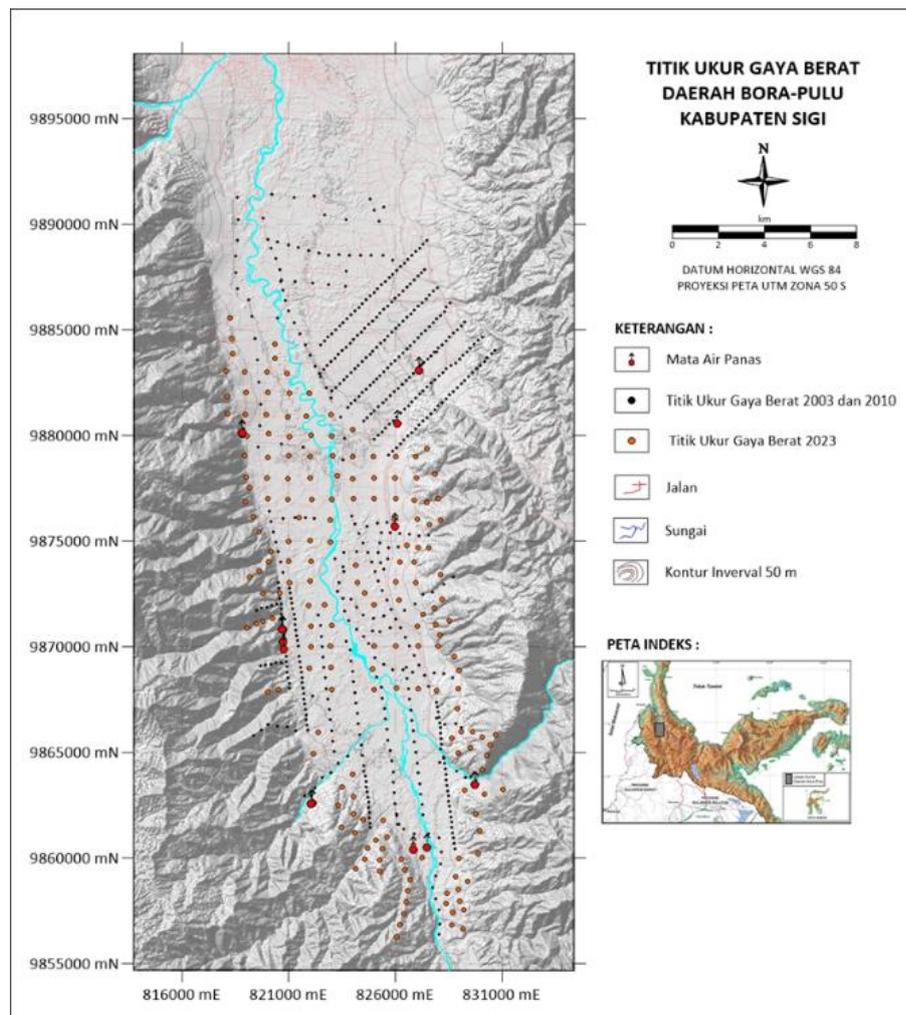


Gambar 2. Geologi Regional Daerah Panas Bumi Bora - Pulu

Untuk mengetahui *trend* anomali regional di daerah survei, dilakukan pemisahan anomali dengan metode *trend surface analysis* menggunakan persamaan polinomial orde-2. Persamaan ini dipilih karena hasilnya secara geologi lebih mendekati kondisi yang sebenarnya di daerah survei. Anomali regional menggambarkan kondisi bawah permukaan secara regional / bagian yang lebih dalam. Sedangkan anomali residual yang diperoleh dengan mengurangkan anomali bouguer lengkap dengan anomali regional. Anomali residual

menggambarkan kondisi bawah permukaan yang relatif dangkal.

Pemodelan data gaya berat di daerah Bora-Pulu dilakukan dengan menggunakan teknik pemodelan ke depan (*forward modeling*). Model penampang dibuat dengan mempertimbangkan informasi geologi dan geosains di daerah survei. Terdapat dua model gaya berat berarah baratdaya-timurlaut yang memotong mata air panas Pulu dan manifestasi Bora serta model berarah baratlaut-tenggara yang memotong mata air panas Pulu dan manifestasi Pakuli.



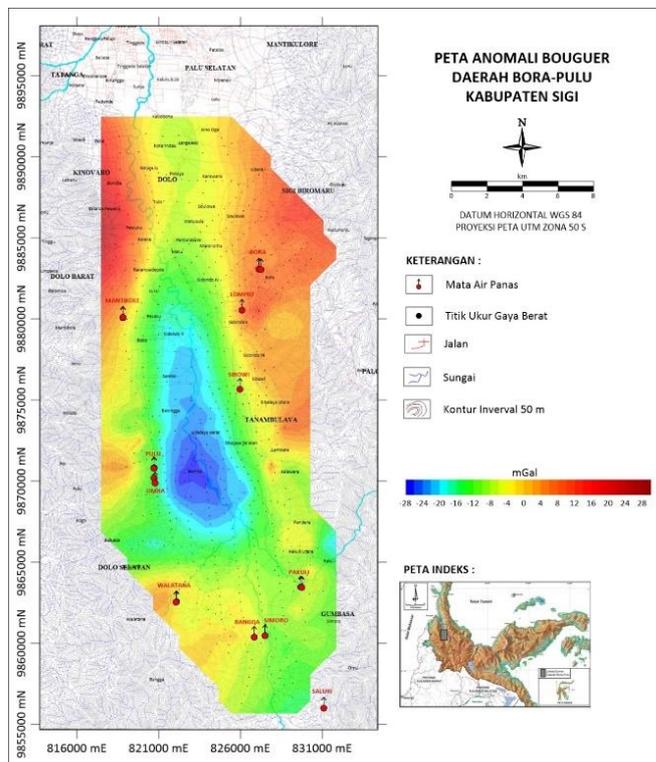
Gambar 3. Peta sebaran titik ukur gaya berat daerah Bora – Pulu

PEMBAHASAN

Peta anomali bouguer lengkap daerah Bora – Pulu memiliki rentang nilai anomali dari -28 hingga 28 mGal. Zona anomali tinggi berada di bagian barat laut area survei (Gambar 4). Jika dibandingkan dengan litologi di daerah survei, area ini diperkirakan berasosiasi dengan batuan granit berumur tersier yang menerobos batuan sekis berumur pra-tercier. Batuan granit ini mengisi area di bagian barat daerah survei memanjang dari utara hingga ke arah baratdaya. Anomali tinggi ini juga mengisi sisi bagian timur hingga ke arah timurlaut yang kemungkinan berasosiasi dengan beberapa jenis litologi batuan. Di bagian tenggara berasosiasi dengan batuan sekis dan granit gneis berumur pra-tercier. Kemudian di bagian timurlaut

kemungkinan berasosiasi dengan batuan granit berumur tersier.

Di sisi selatan area survei yang dekat dengan mata air panas Walatana, mata air panas Bangga dan mata air panas Simoro, terdapat anomali relatif tinggi dibandingkan sekitarnya yang diperkirakan berasosiasi dengan filit berumur pra-tercier dengan umur lebih muda dibandingkan sekis. Anomali rendah < -18 mGal mengisi bagian pedataran di tengah daerah survei. Kemudian terdapat anomali sedang (-18 hingga 10 mGal) dengan sebaran mengelilingi anomali rendah. Anomali sedang ini diperkirakan sebagai respons dari kolovium yang terbentuk akibat longsoran dari bukit-bukit di sisi timur maupun sisi barat area survei.



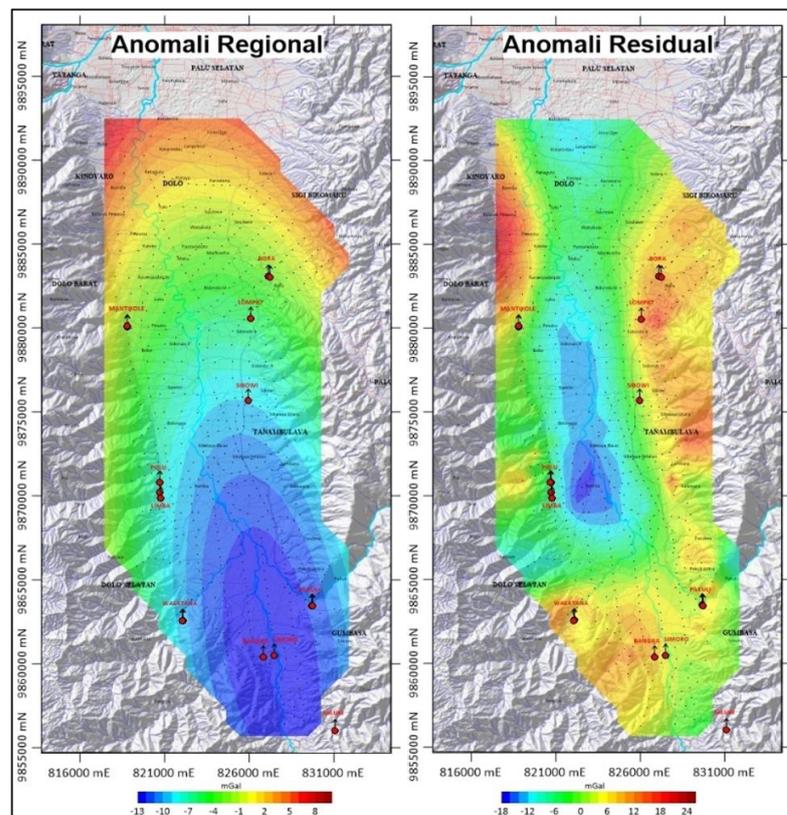
Gambar 4. Anomali bouguer lengkap daerah panas bumi Bora-Pulu

Anomali regional di daerah panas bumi Bora-Pulu memiliki nilai yang relatif tinggi di bagian utara dan rendah di bagian selatan. Rentang nilai anomali regional berkisar dari -13 mGal hingga 10 mGal. Kontras anomalnya memiliki *trend* kelurusan yang relatif berarah barat-laut-tenggara. Kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar Palu Koro di area survei.

Anomali residual memiliki pola yang relatif mirip dengan anomali bouguer lengkap. Anomali ini memiliki rentang nilai dari -18 mGal hingga 26 mGal. Anomali tinggi muncul di bagian barat-laut, bagian timur, serta bagian selatan. Anomali tinggi di bagian barat-laut berasosiasi dengan sekis pra-tercier. Di bagian selatan dari anomali tinggi ini diisi oleh anomali sedang-

tinggi yang berasosiasi dengan granit tersier. Berdasarkan data sebelumnya granit ini merupakan granit Salubi. Anomali tinggi di bagian timur berasosiasi dengan beberapa jenis litologi batuan, di antaranya sekis dan granit gneis berumur pra-tercier, serta granit Oloboju yang berumur tersier. Sedangkan di bagian selatan dari area survei yang terisi oleh batuan filit berumur pra-tercier, dicirikan oleh anomali relatif lebih tinggi dibandingkan dengan area di sekitarnya.

Anomali rendah yang berada di bagian tengah dan utara dari daerah survei merupakan respons dari alluvium. Sedangkan anomali sedang yang mengelilingi anomali rendah tersebut berasosiasi dengan kolovium.



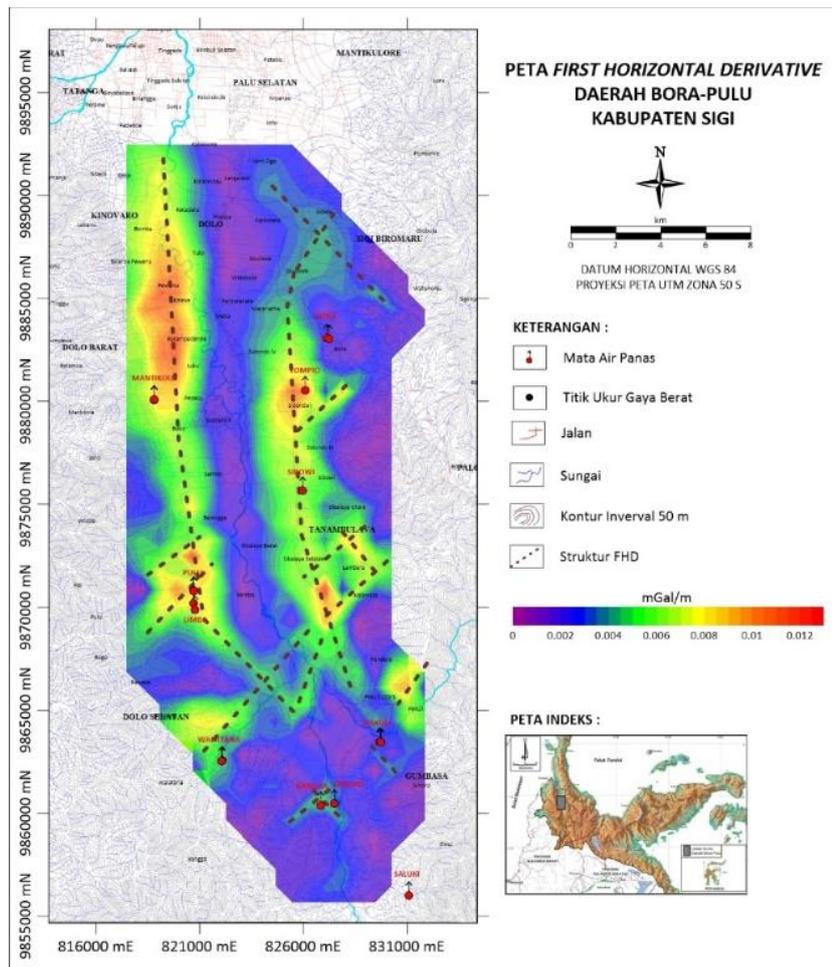
Gambar 5. Anomali regional dan residual daerah panas bumi Bora-Pulu

Berdasarkan analisis FHD (Gambar 6), terdapat beberapa kelurusan yang bisa diperkirakan yaitu kelurusan berarah utara-selatan, baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut.

Di sisi bagian barat terdapat kelurusan berarah relatif utara-selatan yang memotong mata air panas Mantikole dan mata air panas Pulu. Kelurusan berarah baratlaut-tenggara terlihat di sekitar mata air panas Pulu. Pada peta FHD ini, dapat dilihat juga kelurusan berarah relatif baratdaya-timurlaut yang mengontrol kemunculan mata air panas Pulu dan mata air panas Walatana.

Kelurusan saling tegak lurus yang memotong mata air panas Bangga dan mata air panas Simoro terdapat di bagian selatan.

Kelurusan besar berarah relatif utara-selatan yang memotong mata air panas Lompio dan mata air panas Sibowi terlihat di bagian timur. Di area sekitar mata air panas Bora terdapat kelurusan berarah baratdaya-timurlaut dan baratlaut-tenggara. Sedangkan di area mata air panas Pakuli terlihat kelurusan saling tegak lurus yang diperkirakan mengontrol kemunculan mata air panas ini.



Gambar 6. First Horizontal Derivative daerah panas bumi Bora-Pulu

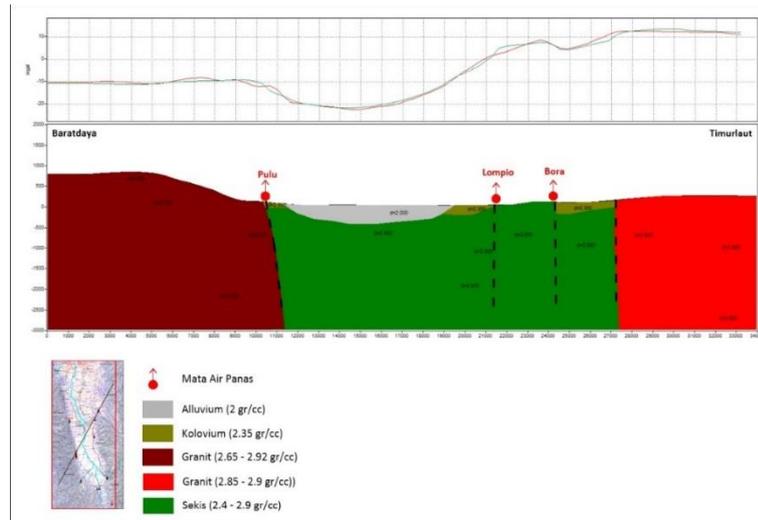
Model gaya berat dilakukan dengan teknik *Forward Modeling* 2 Dimensi. Model pertama adalah model penampang AB yang berarah baratdaya-timurlaut dan memotong mata air panas Pulu, mata air panas Lompio serta manifestasi Bora (Gambar 7). Di bagian baratdaya terdapat *body* dengan densitas 2,65 – 2,92 gr/cc yang membentuk bukit-bukit di bagian barat daerah survei. *Body* ini diinterpretasikan sebagai granit Salubi yang berumur Tersier. Longsor dari bukit di bagian barat ini membentuk kolovium yang terpetakan di dalam peta geologi. Berdasarkan model ini, kolovium memiliki densitas 2,35 gr/cc. Di area tengah model penampang diisi oleh lapisan alluvium yang memiliki densitas 2 gr/cc. Di bagian timurlaut dari model penampang AB terdapat granit Oloboju dengan densitas 2,85 – 2,95 gr/cc.

Batuan sekis pra-tersier terletak di area tengah model penampang pada bagian yang lebih dalam. Batuan ini memiliki rentang densitas 2,4 – 2,9 gr/cc. Batuan ini pun muncul sebagai bukit di baratlaut yang terlihat seperti memisahkan mata air panas Lompio dan mata air panas Bora. Penarikan struktur sesar berdasarkan model ini didasarkan pada kontras densitas yang terlihat. Terdapat beberapa struktur yang bisa diidentifikasi berdasarkan model ini. Struktur berarah utara-selatan yang memotong mata air

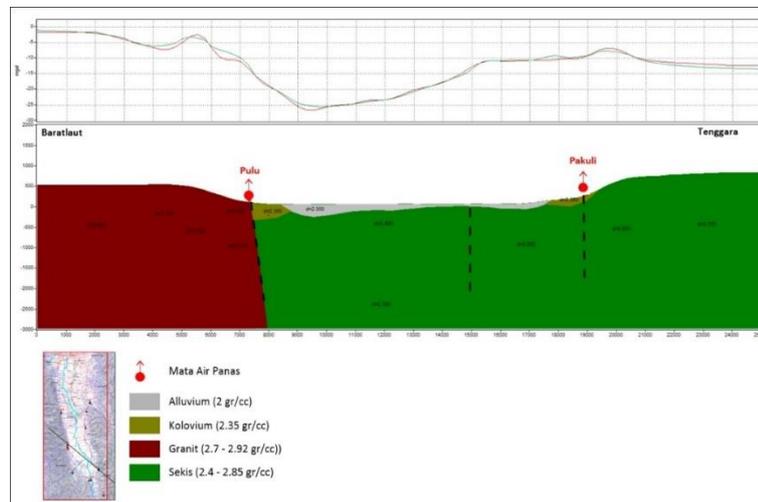
panas Pulu. Struktur ini memisahkan granit yang berada di bagian barat dengan sekis. Kemudian terdapat struktur yang menjadi tempat keluarnya mata air panas Lompio dan mata air panas Bora. Di sebelah timurlaut terdapat struktur yang memisahkan batuan sekis dengan granit.

Model penampang CD berarah baratlaut-tenggara yang memotong mata air panas Pulu dan mata air panas Pakuli (Gambar 8). Di bagian baratlaut dengan rentang nilai densitas 2,7 hingga 2,92 gr/cc merupakan respons dari granit Salubi. Kemudian di bagian tengah yang merupakan pedataran diisi oleh kolovium dan alluvium pada kedalaman dangkal. Kolovium dan alluvium ini masing-masing dicirikan oleh densitas 2,35 gr/cc dan 2,00 gr/cc. Di bagian lebih dalam terdapat batuan sekis pra-tersier. Sekis yang dicirikan oleh rentang nilai densitas 2,4 – 2,85 gr/cc ini tersingkap di permukaan di bagian tenggara membentuk bukit-bukit dengan elevasi tinggi.

Beberapa struktur dapat diinterpretasi pada model penampang ini di antaranya; struktur berarah utara-selatan yang memotong mata air panas Pulu, struktur di bagian tengah model penampang yang kemungkinan telah tertutup oleh alluvium, dan struktur yang mengontrol kemunculan mata air panas Pakuli di bagian tenggara.



Gambar 7. Interpretasi model penampang gaya berat lintasan AB



Gambar 8. Interpretasi model penampang gaya berat lintasan AB

KESIMPULAN

Anomali gaya berat di daerah survei didominasi oleh nilai rendah di bagian tengah yang mengisi area pedataran. Anomali ini diperkirakan sebagai respons dari alluvium. Sedangkan anomali relatif lebih tinggi berada di sekitar perbukitan bagian barat, timur dan juga selatan area survei. Anomali ini diinterpretasikan sebagai respons dari granit, sekis dan filit. Namun anomali tinggi ini tidak bisa

menjelaskan kemungkinan keberadaan sumber panas pada sistem panas bumi di daerah Bora-Pulu, karena batuan-batuan yang memberikan respons anomali tinggi ini berumur tersier hingga pra-tercier.

Struktur yang berkembang di daerah ini didominasi oleh struktur yang berarah utara-selatan. Selain itu terdapat struktur-struktur minor lainnya dengan arah relatif baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2003. Laporan Penyelidikan Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Pulu Kabupaten Donggala Provinsi Sulawesi Tengah. Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral. Bandung.
- Anonim. 2010. Laporan Akhir Penyelidikan Geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Pulu Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah. Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung.
- Anonim. 2010. Laporan Akhir Survei Magnetotellurik Daerah Panas Bumi Bora Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung.
- Anonim. 2010. Laporan Survei Panas Bumi Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Bora, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah. Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung
- Bemmelen, V. R. (1949). *The Geology of Indonesia*. Netherlands: The Hague Vol I.A.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Longman, I. M. (1959). Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. *J. Geophys Res* 64, 51-56.
- Munandar, A. d. (2009). *Laporan Uji Petik dalam rangka Joint Study on Non Volcanic Hosted Geothermal System in Central Part of Sulawesi*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.
- Simanjutak, T., Surono, & Supandjono, J. (1997). Peta Geologi Lembar Poso, Sulawesi. Bandung.
- Sumadirdja, H., Suptandar, T., Hardjoprawiro, S., & Sudana. (1973). Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

SURVEI RINCI GEOKIMIA DAERAH PANAS BUMI BORA-PULU, KABUPATEN SIGI, PROVINSI SULAWESI TENGAH

Ghifara Herninda, Winda Nirmala, dan Dikdik Risdianto

Kelompok Kerja Keprospekan dan Evaluasi Sumber Daya dan Cadangan Panas Bumi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

SARI

Daerah panas bumi Bora-Pulu memiliki 21 pemunculan manifestasi mata air panas dengan temperatur 37,1 - 54,76 °C, mata air hangat dengan temperatur 34,58 °C, dan tanah panas dengan temperatur 93,62 - 99,4 °C yang tersebar di sisi barat timur sesar Palu-Koro. Karakteristik mata air panas dan mata air hangat terbagi menjadi 4 kelompok tipe air, yaitu air tipe bikarbonat, air tipe bikarbonat-klorida, air tipe bikarbonat-sulfat, dan air tipe klorida-bikarbonat. Semua mata air panas berada pada zona *immature waters*, hanya mata air panas Mapane yang berada di batas zona *immature waters* dengan zona *partial equilibrium*. Air panas dominan mengalami pencampuran dengan air meteorik dan terdapat dua zona *upflow* pada area penyelidikan yaitu pada Air Panas Bora dan Air Panas Mapane.

Sistem Panas Bumi daerah Bora-Pulu terbagi menjadi sistem panas bumi Bora, Mapane, Pulu, dan Mantikole yang berasosiasi dengan aktivitas tektonik-magmatik. Pendugaan temperatur pada sistem panas bumi Bora diperoleh geotermometer sebesar 187 °C (geotermometer Na-K-Ca) dan 185 °C (Entapi klorida), sistem panas bumi Mapane sebesar 220 °C (geotermometer Na-K) dan 210 °C (Entapi klorida), sistem panas bumi Pulu sebesar 120 °C (geotermometer silika), dan pada sistem panas bumi Mantikole sebesar 98 °C (geotermometer silika). Perkiraan luas daerah prospek geokimia berdasarkan dari hasil kompilasi data penyelidikan saat ini berupa spot-spot kecil yang tersebar di area munculnya manifestasi.

Kata kunci: Geokimia, bora-pulu, manifestasi panas bumi, sistem panas bumi

PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Bora-Pulu merupakan salah satu wilayah yang terpilih dalam pelaksanaan eksplorasi panas bumi oleh Pemerintah tahun anggaran 2023. Salah satu bentuk kegiatan yang dilakukan adalah survei rinci geokimia.

Secara administratif, daerah panas bumi Bora-Pulu termasuk dalam wilayah Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah dan terletak pada koordinat geografis antara 119° 49' 8" – 119° 59' 1" BT serta 0° 55' 16" LS – 1° 18' 46" LS (**Gambar 1**).

Maksud dari survei geokimia daerah panas bumi Bora-Pulu adalah untuk mendapatkan sifat fisik dan kimia manifestasi panas bumi, serta kandungan Hg dan CO₂ pada udara tanah. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui karakteristik fluida, estimasi temperatur bawah permukaan (*reservoir*), dan mengetahui zona permeabilitas pada sistem panas bumi yang terbentuk di daerah Bora-Pulu.

Lingkup kegiatan dalam survei geokimia ini meliputi pengamatan dan pengukuran sifat fisik dan kimia manifestasi panas bumi, analisis kimia fluida panas bumi, pengukuran Hg dan CO₂ udara tanah, pengolahan dan analisis data, interpretasi hasil analisis, serta pembuatan laporan akhir.

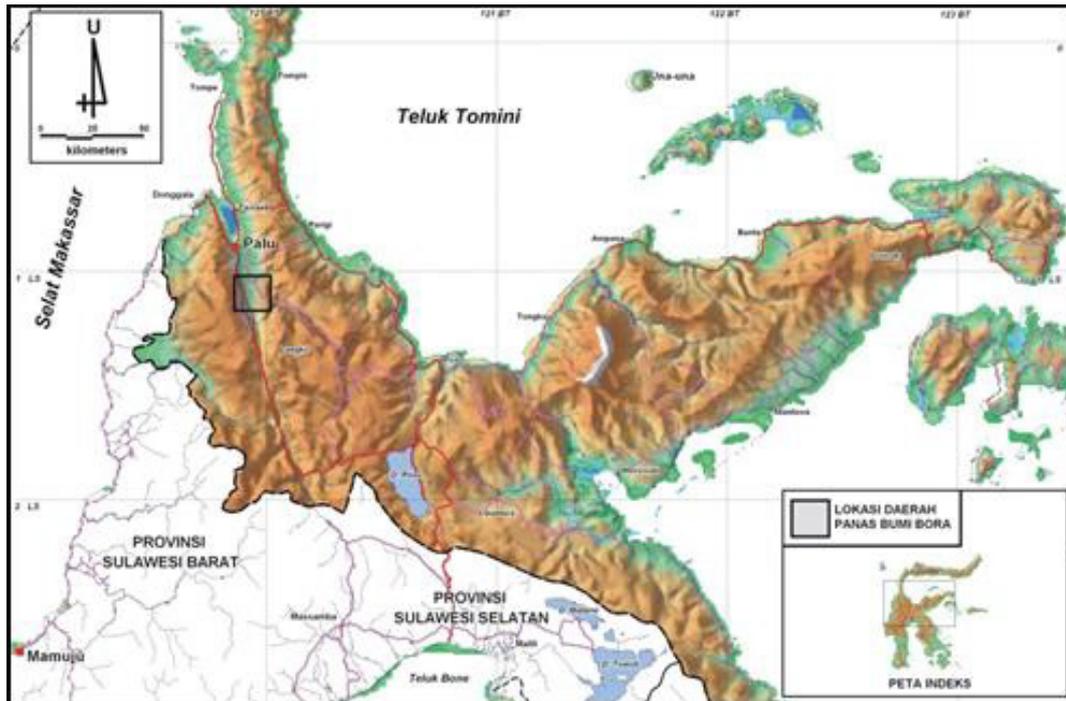
METODOLOGI

Survei geokimia merupakan salah satu metode yang digunakan dalam melakukan eksplorasi panas bumi. Secara umum, survei ini dibagi menjadi tahapan studi literatur, penyelidikan lapangan dan pengambilan contoh, analisis laboratorium, serta pengolahan dan interpretasi data. Studi literatur bertujuan untuk mempelajari dan atau mengumpulkan data yang relevan dari hasil survei terdahulu sebagai data pendukung kegiatan survei. Penyelidikan lapangan terdiri dari tahapan pengamatan terhadap kenampakan gejala panas bumi di permukaan, pengukuran sifat fisik, pengambilan dan preparasi conto air sebagai bahan analisis di laboratorium

untuk analisis *major element* (unsur utama), isotop, gas, serta pengambilan conto tanah dan udara tanah pada kedalaman satu meter.

Conto air, isotop, gas, serta conto tanah dan udara tanah yang diperoleh di lapangan kemudian dilakukan analisis di laboratorium. Analisis kimia air untuk mengetahui konsentrasi senyawa kimia, tipe dan klasifikasi air panas, serta latar belakang terbentuknya air panas yang erat hubungannya dengan jenis sumber dan proses keterjadiannya. Analisis isotop ¹⁸O dan ²H menggunakan *spectrophotometer massa* untuk mengetahui kualitas interaksi fluida dengan mineral batuan yang mungkin telah terjadi. Pendugaan temperatur bawah permukaan dilakukan berdasarkan perhitungan geotermometer air dan atau geotermometer gas tergantung dari hasil analisis conto air dan conto gas. Analisis conto tanah untuk mengetahui konsentrasi Hg dan CO₂ dari setiap titik lokasi *sampling*, sehingga dapat dibuat distribusi dan daerah anomali dengan konsentrasi tinggi.

Pengolahan data dilakukan setelah kegiatan lapangan dan analisis laboratorium selesai. Pengolahan dan interpretasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik kimia fluida panas bumi, penentuan geotermometer, dan distribusi lateral zona permeabel sehingga dapat ditentukan model geokimia sistem panas bumi di daerah tersebut.



Gambar 1. Peta indeks lokasi daerah survei

GEOLOGI DAERAH BORA-PULU

Berdasarkan penyelidikan geologi terdahulu (Anonim, 2003; Anonim, 2010), stratigrafi daerah Bora-Pulu dapat dikelompokkan ke dalam tujuh satuan batuan. Urutan satuan batuan dari tua ke muda adalah sebagai berikut.

1) Satuan Sekis (Trs)

Terdiri dari sekis berwarna abu-abu kehijauan, berlapis sebagai bidang foliasi, kompak, berbutir halus, lanau sampai lempung.

2) Satuan Granit Genes (Trg)

Merupakan bagian dari tubuh intrusi granitoid regional yang berumur Trias. Secara megaskopis, batuan berwarna abu-abu terang sampai kehitaman, berbintik hitam, bertekstur porfiritik sampai faneritik.

3) Satuan Filit (Kf)

Terdiri dari dominan filit dan batusabak. Filit berwarna abu-abu kehitaman, sangat keras, berlapis sebagai bidang foliasi, berbutir halus, lanau sampai lempung.

4) Satuan Granit Salubi (Tgs)

Secara megaskopis berwarna putih kelabu, berbintik hitam, dengan komposisi mineral terdiri dari kuarsa, plagioklas, ortoklas serta mineral gelap lainnya (biotit, hornblende, amfibol), bertekstur faneritik, dengan bentuknya euhedral-subhedral.

5) Satuan Granit Oloboju (Tgo)

Berwarna putih kelabu, berbintik hitam, dengan komposisi mineral terdiri dari kuarsa, plagioklas, ortoklas serta mineral gelap lainnya (biotit,

hornblende, amfibol), bertekstur porfiritik, bentuk euhedral-subhedral. Hasil pentarikan umur (*dating*) dengan menggunakan metode jejak belah (*fission track*) menunjukkan bahwa umur satuan ini adalah $6,7 \pm 0,2$ juta tahun (Kala Miosen Atas).

6) Satuan Sedimen (Qs)

Satuan sedimen ini terdiri dari perselingan batupasir dengan konglomerat.

7) Aluvium (Qal)

Endapan terdiri dari material lepas berupa lempung, pasir, batuan metamorf, dan bongkahan granit.

Struktur geologi yang ada adalah berupa struktur sesar yang umumnya berarah relatif utara-selatan dan barat-timur, yang terdiri dari :

- 1) Sesar Palu-Koro berarah utara-selatan. Secara regional sesar ini merupakan zona struktur berjenis sesar mendatar sinistral.
- 2) Sesar normal Sidera berarah barat-timur.
- 3) Sesar normal Oloboju berarah barat-timur.
- 4) Sesar *obliq* Bora berarah barat laut-tenggara. Sesar ini berjenis sesar *obliq* atau sesar normal dengan pergerakan manganan (*dextral*).
- 5) Sesar-sesar normal dan mendatar berarah utara-selatan dan barat-timur yang memotong dan mengakibatkan pergeseran pada batuan dan struktur yang sudah terbentuk sebelumnya.

HASIL ANALISIS

Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi di daerah bora pulu umumnya berupa mata air panas yang tersebar pada sisi timur dan barat area penyelidikan di sepanjang struktur Palu-Koro. Manifestasi panas Bora Pulu dikelompokkan menjadi delapan, sebagai berikut.

1) Kelompok Bora

Kelompok Bora Terletak di bagian paling utara area penyelidikan. Pada kelompok ini terdapat satu pemunculan mata air panas yaitu Air Panas Bora (APB) berupa kolam dengan temperatur air sebesar 91°C . Tanah beruap yaitu *Steaming Ground* Bora (SGB) dengan temperatur uap $93,62^{\circ}\text{C}$, batuan ubahan/alterasi seluas $30 \times 60 \text{ m}^2$, dan tanah panas dengan temperatur berkisar $33,3 - 73,5^{\circ}\text{C}$ juga di temukan dalam kelompok ini.

2) Air Panas Lompio (APL)

Mengalir dari celah alluvium yang telah terpasang pipa sehingga membentuk rawa dan memiliki temperatur $50,89^{\circ}\text{C}$.

3) Air Panas Sibowi (ASSB)

Merupakan air panas hasil pengeboran sumur dengan kedalaman lebih dari 80 meter yang memiliki temperatur sebesar $45,22^{\circ}\text{C}$.

4) Kelompok Mapane

Berada di Desa Pakuli, Kecamatan Gumbasa. Pada kelompok ini terdapat dua pemunculan mata air panas yaitu

Air Panas Mapane 1 (APMP 1) dan Air Panas Mapane 2 (APMP 2) dengan temperatur air 94,79 – 95,0 °C dan pemunculan tanah beruap yaitu *Steaming Ground* Mapane (SGMP) dengan temperatur uap 99,39 °C. Terdapat juga Batuan Ubahan dan Tanah Panas (TPMP) yang berada di bagian timur dari aliran Sungai Gumbasa.

- 5) Air Panas Saluki (APSL)
Berada di Kawasan Taman Nasional Lore Lindu. Keluar dari celah batuan dengan temperatur air sebesar 54,7 °C.
- 6) Air Panas Simoro (APSM)
Terletak di tepi aliran sungai. Air panas keluar dari celah batupasir dengan temperatur air 37,1 °C.
- 7) Air Panas Bangga (ASB)
Berupa sumur bor dengan kedalaman 70 meter dengan pompa listrik tenaga surya. Memiliki temperatur air 41,67 °C.
- 8) Air Panas Walatana/Saluri
Kelompok air panas ini keluar melalui celah batuan pada tebing Sungai Saluri sepanjang kurang lebih 10 meter. Terdapat beberapa titik keluaran mata air panas yaitu Air Panas Walatana 1 (APWT 1) dan Air Panas Walatana 2 (APWT 2) dengan temperatur 40,3 - 42,79 °C.
- 9) Air Panas Limba (APL)
Muncul di tengah perkebunan coklat berbentuk kolam 1,5x1,5 meter dan memiliki temperatur 44,13 °C.

10) Kelompok Air Panas Pulu

Memiliki beberapa titik kemunculan air panas yang terletak di rekahan batuan sepanjang tebing sungai sejauh 100 meter. Terdapat empat mata air panas yaitu Air Panas Pulu 1 (APP 1), Air Panas Pulu 2 (APP 2), Air Panas Pulu 3 (APP 3), dan Air Panas Pulu 4 (APP 4) dengan temperatur 75,13 - 77,9 °C.

11) Air Panas Mantikole

Air panas muncul dari celah alluvium yang dimanfaatkan sebagai tempat wisata pemandian air panas. Pada kelompok ini terdapat dua pemunculan mata air panas yaitu Air Panas Mantikole 1 (APMK 1) dan Air Panas Mantikole 2 (APMK 2) dengan temperatur air 41,18 - 41,31 °C.

12) Air Hangat Limba (AHL)

Berada di Desa Rogo, Kecamatan Dolo Selatan. Air panas ini muncul dari rekahan alluvium dengan temperatur 34,58 °C.

Kimia Fluida Panas Bumi

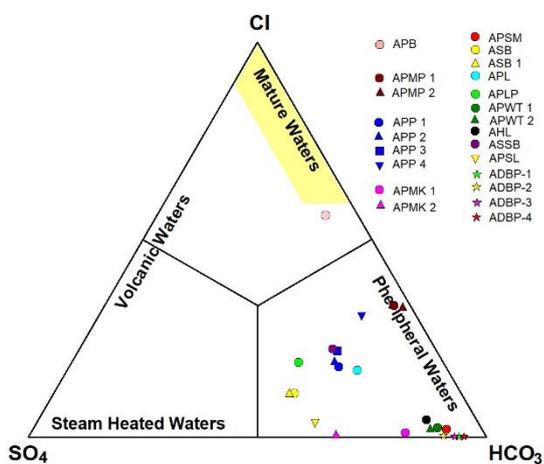
Berdasarkan hasil analisis diagram segitiga $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ (**Gambar 2**) karakteristik mata air panas dan mata air hangat terbagi menjadi 4 kelompok tipe air, yaitu air tipe bikarbonat, air tipe bikarbonat-klorida, air tipe bikarbonat-sulfat, dan air tipe klorida-bikarbonat.

Air Panas Simoro, Air Panas Walatana 1, Air Panas Walatana 2, dan Air Hangat Limba bertipe bikarbonat. Tipe bikarbonat biasanya menunjukkan

karakteristik air permukaan dan berasosiasi dengan proses naiknya fluida mengandung CO₂ yang mengalami kondensasi di akuifer dangkal. Hal ini terlihat pada konsentrasi Ca dan Mg yang relatif tinggi sebagai karakteristik dari air permukaan.

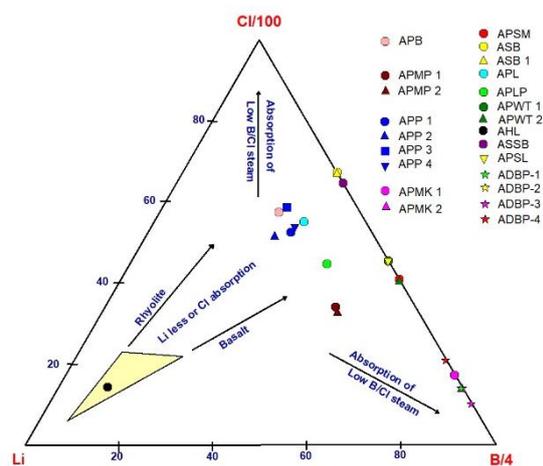
Air Panas Pulu 4, Air Panas Mapane 1, dan Air Panas Mapane 2 bertipe bikarbonat klorida sedangkan untuk Air Panas Bora bertipe klorida bikarbonat. Tipe ini diduga dihasilkan dari pencampuran air klorida dari reservoir saat menuju ke permukaan dengan air permukaan/meteorik.

Air panas Bangga, air panas Limba, air panas Pulu 1, air panas Pulu 2, air panas Pulu 3, air panas Mantikole 1, air panas Mantikole 2, air panas Lompio, air panas Sibowi dan air panas Saluki termasuk dalam tipe bikarbonat sulfat. Sulfat yang ada mungkin diperoleh dari interaksi zat-zat organik di permukaan maupun air hujan.



Gambar 2. Diagram segitiga CI-SO₄-HCO₃ daerah panas bumi Bora-Pulu

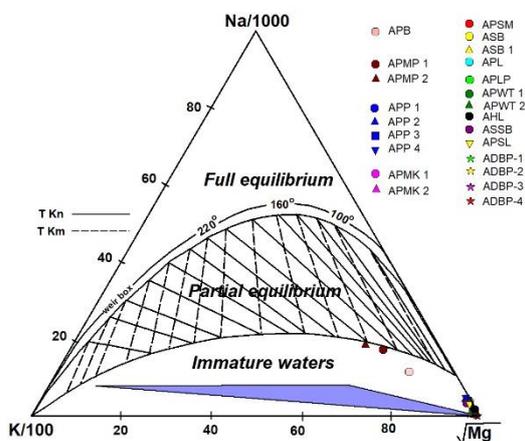
Diagram CI-Li-B (Gambar 3) menunjukkan bahwa daerah penyelidikan terbagi menjadi tiga kelompok dengan kemiripan reservoir atau kematangan reservoir. Kelompok 1 adalah Air Panas Bora, Air Panas Pulu, Air Panas Sibowi, Air Panas Bangga, Air Panas Limba, Air Panas Lompio, dan Air Hangat Lompio. Kelompok 2 terdiri dari Air Panas Mapane, Air Panas Walatana, dan Air Panas Simoro. Kelompok 3 terdiri dari Air Panas Mantikole. Kehadiran Li pada air panas kelompok Pulu, Bora, Mapane mengindikasikan bahwa air panas berasal dari proses interaksi antara batuan granit dengan fluida panas. Air Panas Sibowi dan Air Panas Bangga memiliki rasio CI/B lebih tinggi, hal ini mungkin dikarenakan kedua air panas diperoleh bukan dari mata air melainkan dari sumur buatan.



Gambar 3. Diagram segitiga CI-Li-B daerah panas bumi Bora-Pulu

Dalam diagram konsentrasi Na-K-Mg (Gambar 4), sebagian besar air panas berada pada zona *immature waters*. Air

Panas Mapane berada di batas zona *immature waters* dengan zona *partial equilibrium* yang mengindikasikan fluida dari reservoir mengalami pencampuran dengan air permukaan setelah sempat mengalami *boiling* di kedalaman sehingga kadar Na dan K masih tinggi. Hampir semua mata air panas memiliki kadar Mg yang tinggi yang diduga akibat adanya pencampuran air permukaan yang sangat signifikan.



Gambar 4. Diagram segitiga Na-K-Mg daerah panas bumi Bora-Pulu

Isotop ^{18}O dan ^2H

Hasil plotting isotop ^{18}O dan Deuterium terhadap *local meteoric water line* (LMWL), Manado *meteoric water line* (Belgaman, 2016), dan *global meteoric water line* (GMWL), seluruh mata air panas berada di *meteoric water line* kecuali Air Panas Mapane 1, Air Panas Mapane 2, dan Air Panas Bora. Ketiga air panas ini mengalami pengkayaan Oksigen 18 dan Deuterium oleh adanya interaksi dengan batuan atau fluida magmatis. Air panas

yang berada di garis MWL dan GMWL diduga akibat pencampuran dengan air permukaan yang juga berada di garis *evaporation* $\delta\text{D}=6\delta^{18}\text{O} - 3,479$ (Nicholson, 1993) dimungkinkan karena pencampuran dengan air evaporasi.

Kimia Gas

Terdapat empat sampel gas yang berasal dari *Steaming Ground* Mapane (SGMP 1 dan SGMP 2) dan *Steaming Ground* Bora (SGB 3 dan SGB 4). Adanya gas metana (CH_4) dengan range 0,02- 4 mmol% diduga akibat dari adanya alterasi batuan sedimen di bawah permukaan yang didukung oleh rasio N_2/Ar yang tinggi. Adanya gas H_2S yang muncul pada sampel gas dimungkinkan karena adanya pengaruh batuan magmatis. Hasil analisis kimia gas menunjukkan seluruh sampel gas berada di area *meteoric* dengan $\text{N}_2/\text{Ar} < 38$ dan $\text{He}/\text{Ar} > 0,001$, sehingga dapat dikatakan bahwa gas berasal dari udara permukaan.

Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan

Perkiraan temperatur bawah permukaan sistem panas bumi Bora dan sistem panas bumi Mapane dilakukan dengan beberapa metode perhitungan yaitu geotermometer air dan entalpi klorida.

Sistem panas bumi Mapane dihitung menggunakan geotermometer Na-K karena dianggap mengalami *boiling* terlebih dahulu kemudian mengalami

mixing dengan air permukaan, sehingga diperoleh geotermometer sebesar 220 °C (Na-K) dan 210 °C (Entalpi klorida).

Estimasi temperatur pada sistem panas bumi Bora ditentukan berdasarkan geotermometer Na-K-Ca. Hal tersebut dikarenakan manifestasi terletak di zona immature water yang memiliki percampuran dengan air permukaan lebih banyak. Selain itu juga komposisi kimianya memenuhi syarat untuk perhitungan geotermometer Na-K-Ca yaitu memiliki $Ca^{0,5}/Na > 1$ (Nicholson, 1993). Hasil perhitungan geotermometer didapatkan temperatur sebesar 187 °C (Na-K-Ca) dan 185 °C (Entalpi klorida) (**Gambar 5**).

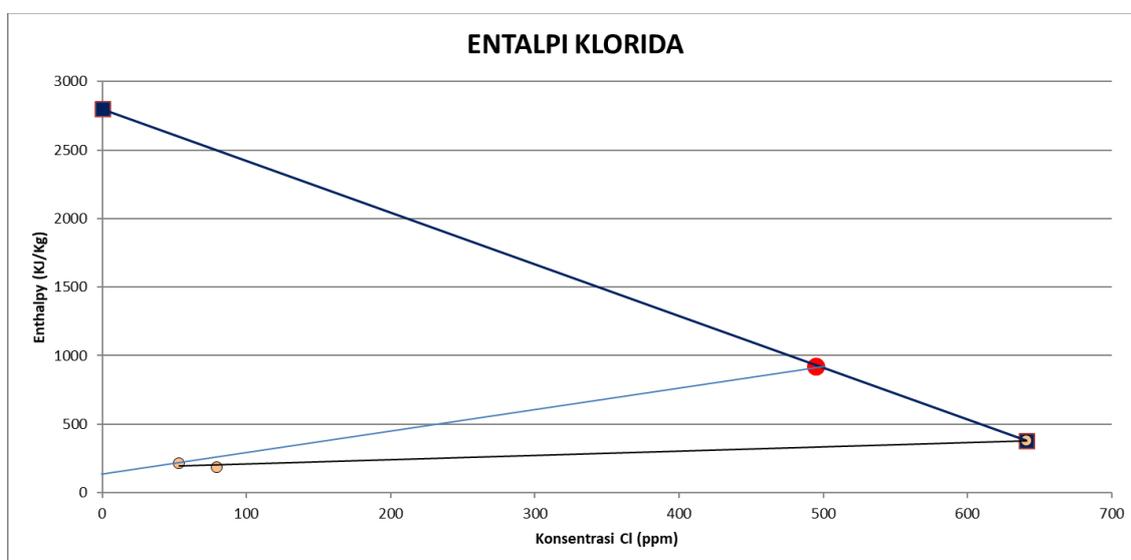
Perkiraan temperatur bawah permukaan untuk sistem panas bumi Pulu menggunakan geotermometer silika sebesar 120°C. Estimasi temperatur pada sistem panas bumi Mantikole sebesar 98 °C dengan menggunakan geotermometer silika.

Geokimia Udara Tanah

Pengambilan contoh tanah dan udara tanah dilakukan pada 133 titik dengan sebaran berupa *grid* dengan jarak 500 - 1000 meter pada kedalaman 50 - 150 cm. Hasil pengukuran temperatur, pH, Hg, dan CO₂ udara tanah selanjutnya dilakukan perhitungan secara statistika dan ditampilkan dalam bentuk peta distribusinya. Daerah Anomali (*Threshold Value*) ditentukan dengan menggunakan pendekatan nilai rata-rata (*Mean*) + Standar Deviasi (Suryantini, 2013; Phuong, N.K., 2012; Risdianto dan Kusnadi, 2010)

Peta Sebaran Temperatur

Temperatur udara tanah berkisar 27,70 °C sampai dengan 38 °C. Peta distribusi temperatur (**Gambar 6**) memperlihatkan anomali tinggi > 36,05 °C berada di sekitar manifestasi.



Gambar 5. Diagram Entalpi Klorida Sistem Bora

Peta Sebaran pH

Nilai pH terendah sebesar 4,85 dan tertinggi sebesar 7,83. Peta distribusi pH tanah (Gambar 7) memperlihatkan nilai rendah < 5,35 di sekitar mata air panas Mapane dan berada di sisi selatan mata air panas Pulu hingga ke mata air panas Saluki. Hal ini diperkirakan berhubungan dengan kehadiran mineral aletasi berupa *alunite* di sekitar mata air panas Mapane. Selain di sekitar mata air panas Mapane, anomali juga muncul di daerah depresi sisi barat yang mengkonfirmasi adanya sesar.

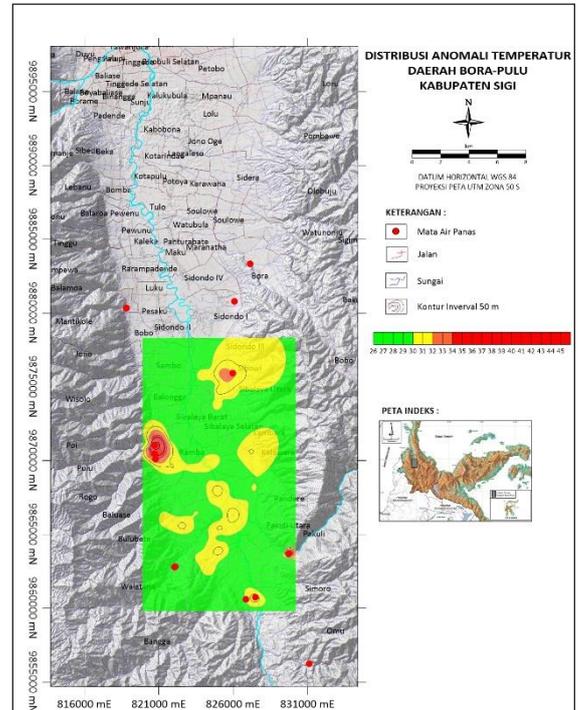
Peta Sebaran CO₂

Konsentrasi CO₂ memiliki nilai terendah 0,00% sampai dengan konsentrasi tertinggi 10,15%. Peta distribusi nilai CO₂ udara tanah (Gambar 8) memperlihatkan anomali tinggi > 5,58% terletak di sekitar mata air panas terutama mata air panas Mapane dan beberapa *spot* di area tengah penyelidikan atau area depresi.

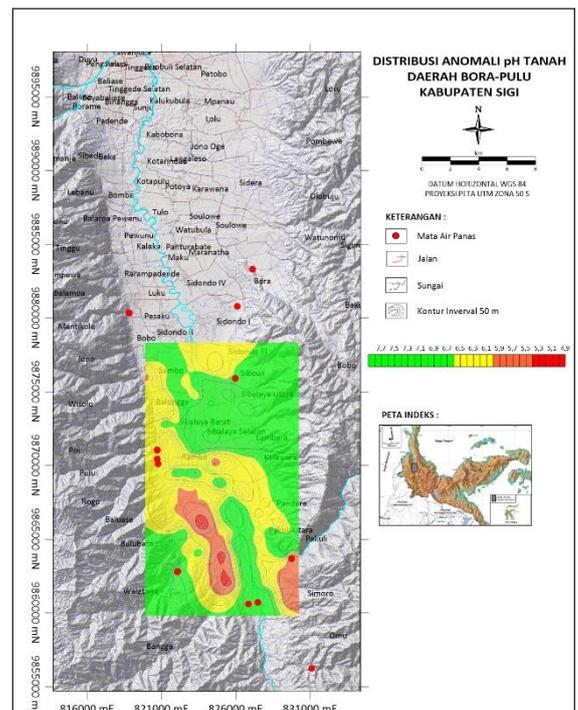
Peta Sebaran pH

Konsentrasi Hg tanah bervariasi mulai dari konsentrasi 1,24 ppb sampai dengan konsentrasi 12178,33 ppb. Peta distribusi nilai Hg tanah (Gambar 9) memperlihatkan anomali relatif tinggi dengan nilai > 50 ppb berada di sekitar mata air panas Mapane dan anomali sedang berada di sisi barat dan timur mengarah ke tenggara-barat laut. Anomali Hg menunjukkan adanya permeabilitas

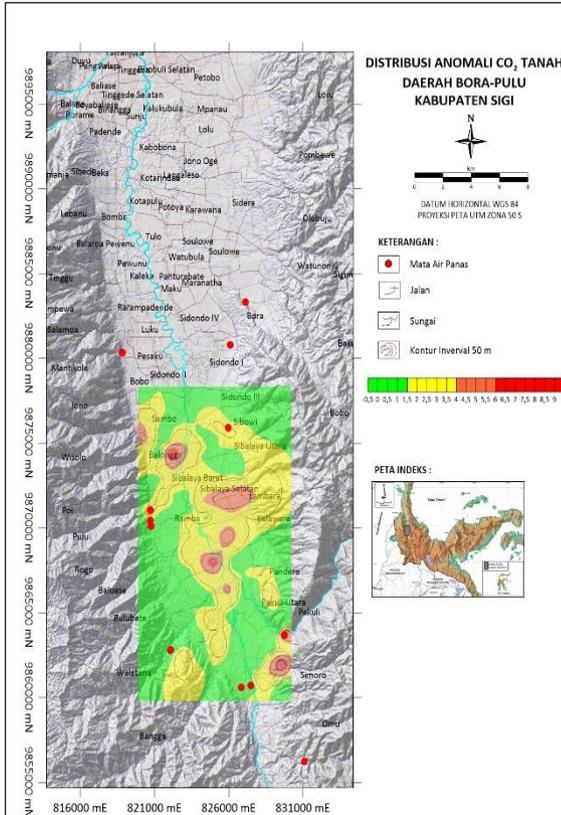
yang juga mengkonfirmasi adanya struktur yang mengontrol keberadaan air panas.



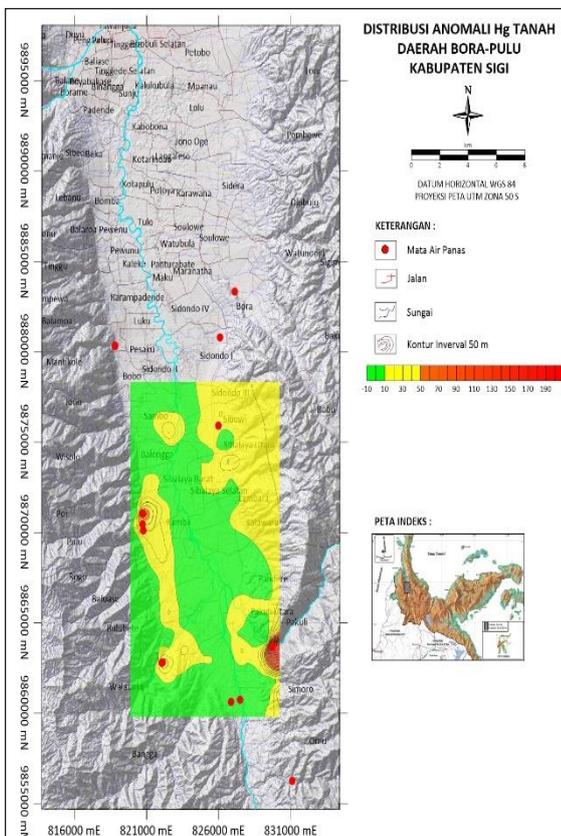
Gambar 6. Peta Distribusi Anomali Temperatur Udara Tanah



Gambar 7. Peta Distribusi Anomali pH Tanah



Gambar 8. Peta Distribusi Anomali CO₂ Tanah



Gambar 9. Peta Distribusi Anomali Hg Tanah

PEMBAHASAN

Pola Aliran Fluida Panas Bumi

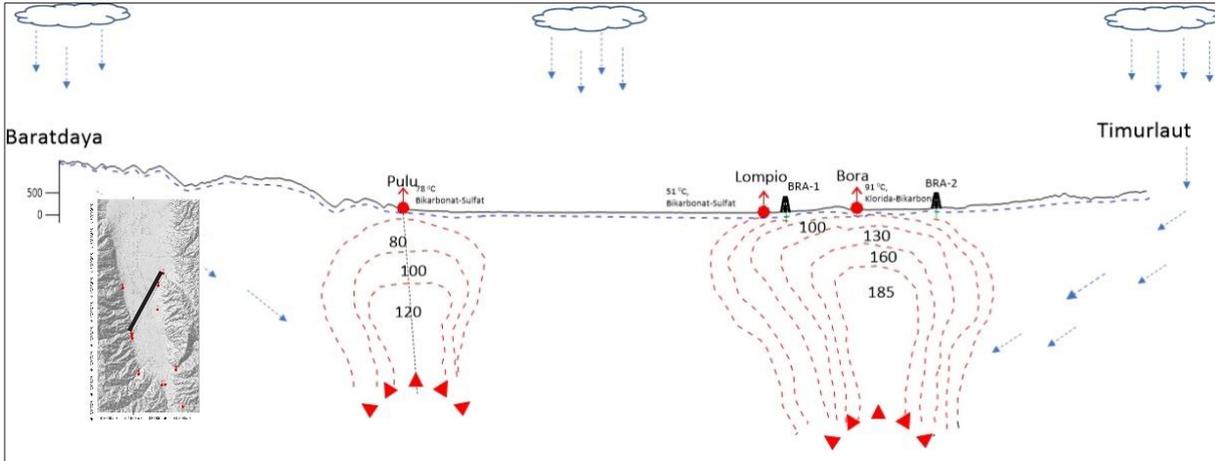
Berdasarkan hasil analisis dan interpretasi data kimia air maupun gas, diperoleh bahwa sistem panas bumi di daerah penyelidikan Bora-Pulu memiliki lebih dari satu sistem. Dari kriteria zona *upflow* yang dikemukakan oleh Nicholson, 1993 berupa rasio antara beberapa unsur, terdapat dua zona *upflow* pada area penyelidikan yaitu pada Air panas Mapane dan Air panas Bora. Hal tersebut juga didukung oleh konsentrasi SiO₂ yang cukup signifikan dibanding yang lain dan kemunculan manifestasi berupa tanah uap serta tanah panas di sekitar kedua manifestasi tersebut.

Berdasarkan tipe manifestasi, rasio Cl/B, dan analisis anomali gas udara tanah, dapat diinterpretasikan bahwa sistem panas bumi di daerah penyelidikan Bora-Pulu berupa *spot-spot* seperti pada umumnya sistem panas bumi non-vulkanik karena diperkirakan lebih dikontrol oleh struktur sesar terutama pada zona pertemuan sesar utama dengan sesar sekundernya diperkirakan memiliki permeabilitas lebih tinggi.

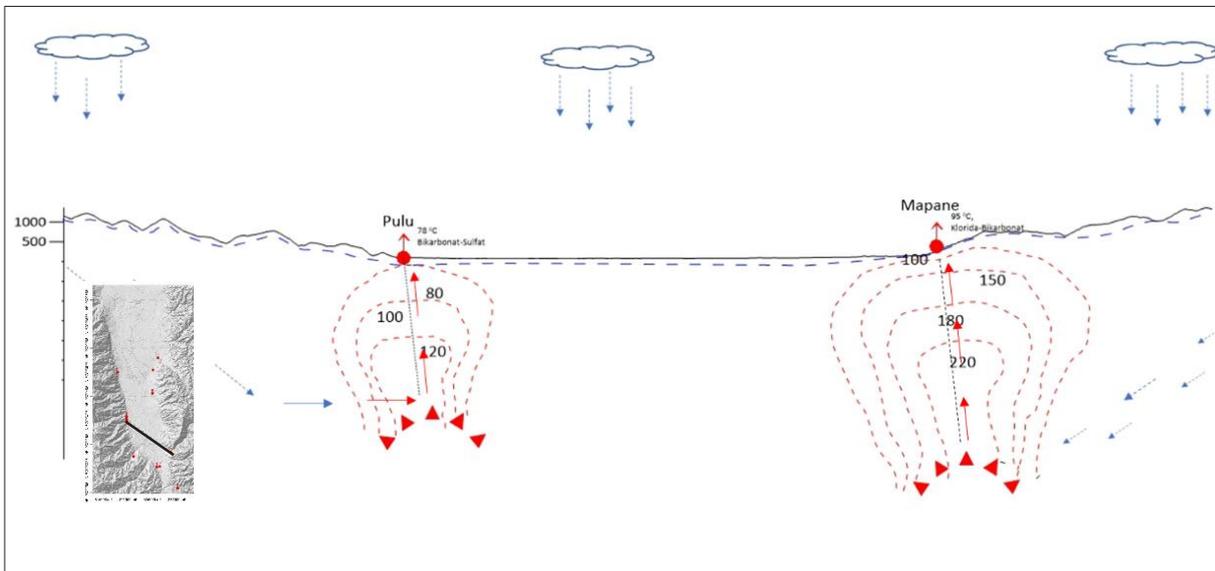
Sistem panas bumi Bora dan Mapane memiliki karakter yang hampir sama baik manifestasi maupun reservoirnya. Berdasarkan kondisi di permukaan kedua sistem ini sama-sama memiliki manifestasi berupa mata air panas, uap panas, tanah panas, dan alterasi batuan. Fluida di daerah Mapane

bertipe klorida bikarbonat yang diduga berasal dari air reservoir dari kedalaman yang naik ke permukaan melalui rekahan-rekahan batuan yang diakibatkan adanya aktivitas tektonik. Tipe klorida bikarbonat terbentuk adanya pencampuran fluida reservoir dengan air *meteoric* yang kaya akan HCO_3 . HCO_3 mungkin terbentuk dari interaksi gas CO_2 dengan air meteorik di kedalaman yang dangkal atau permukaan, sehingga diduga fluida telah mengalami *boiling* (ditunjukkan oleh rasio Cl/B yang rendah) terlebih dahulu lalu mengalami *mixing* dengan air bikarbonat tersebut. Hal ini pula yang menyebabkan adanya pengkayaan deuterium dan oksigen serta mengganggu kesetimbangan, sehingga sedikit menarik ke arah *immature water*. Proses yang sama terjadi pada system panas bumi Bora yang membedakan adalah kadar *mixing* yang terjadi jauh lebih besar sehingga lebih mengarah ke area *immature water*. Adanya gas H_2S dan terciumnya bau belerang diduga terkait oleh sumber panas dari sistem panas bumi Bora dan Mapane yang berasal dari sisa magma ataupun batuan *Plutonic* berupa granit. Karakter fluida reservoir antara manifestasi Bora dan Mapane hampir sama, sehingga dapat diduga bahwa memiliki sistem pola aliran fluida yang hampir sama walaupun berbeda sistem.

Selain sistem panas bumi Bora dan Mapane, diduga terdapat sistem lainnya yaitu sistem panas bumi Pulu dan Mantikole. Fluida pada sistem panas bumi Pulu dan Mantikole berbeda dengan sistem Bora maupun Mapane. Hal ini terlihat dari karakteristik fluida yang lebih menyerupai air permukaan atau *outflow* dengan tipe air bikarbonat maupun bikarbonat sulfat. Arah aliran fluida ke kelompok air panas Pulu dan Mantikole masih dipertanyakan karena secara jarak, hidrogeologi dan kemungkinan adanya struktur kecil, kemungkinan adanya aliran fluida dari sistem upflow Bora maupun Mapane sehingga dapat di mungkinkan bahwa area penyelidikan ini memiliki empat sistem ataupun kantong reservoir yaitu kelompok Bora, kelompok Mapane/Pakuli, kelompok Pulu dan kelompok Mantikole (**Gambar 10 dan 11**). Adanya sulfat diduga akibat interaksi dengan zat-zat organik di sekitar keluarnya mata air panas. Fluida pada kedua sistem ini diduga berasal dari air *meteoric* yang masuk ke dalam permukaan karena adanya panas dari batuan dan rekahan akibat aktivitas tektonik sehingga mendorong air kembali ke permukaan menjadi air panas. Pengkayaan unsur kimia pada fluida disebabkan adanya interaksi terhadap batuan selama perjalanan menuju permukaan.



Gambar 10. Pola Aliran Fluida dengan Penampang Baratdaya-Timurlaut

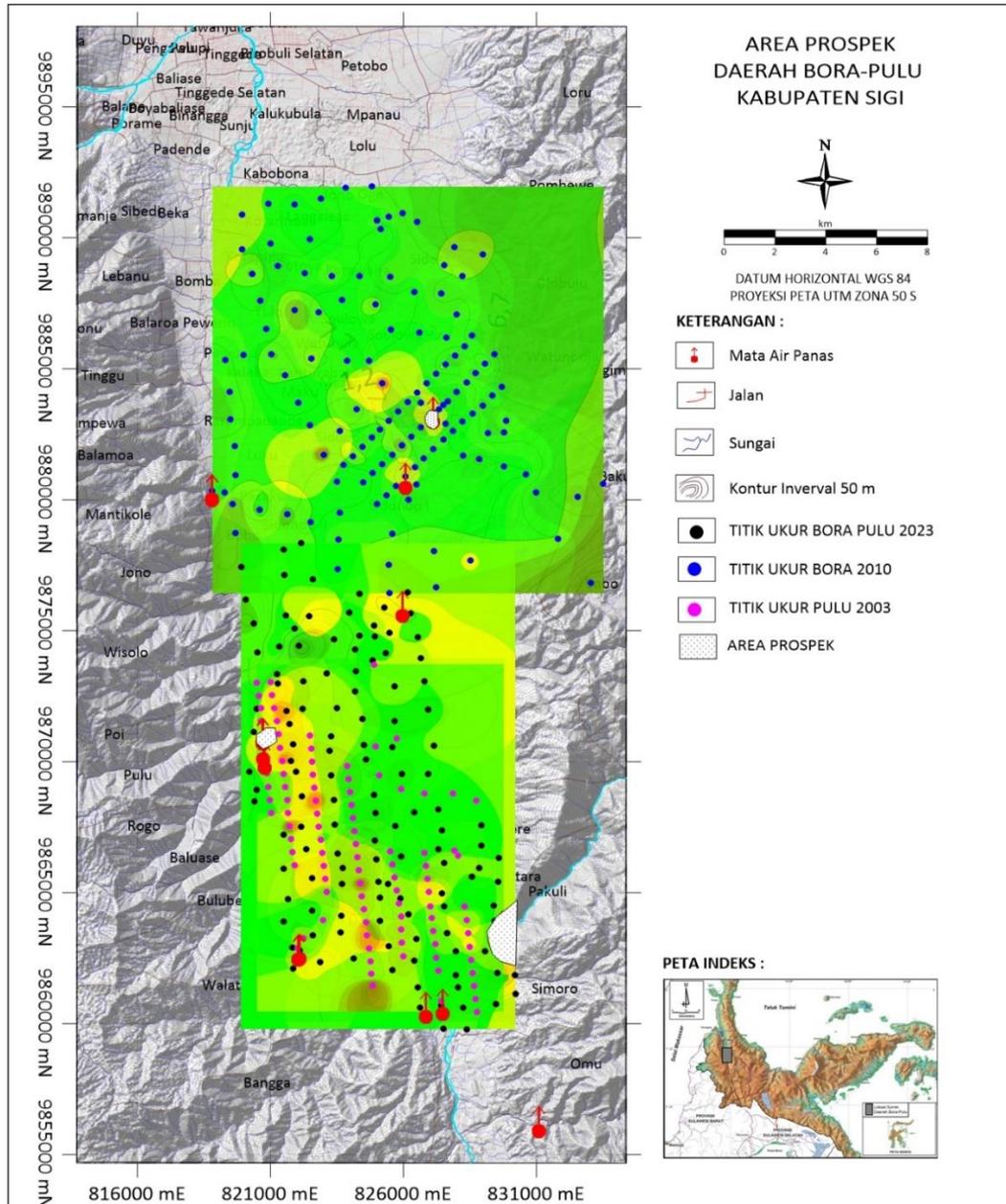


Gambar 11. Pola Aliran Fluida dengan Penampang Baratlaut-Tenggara

Area Prospek Panas Bumi

Perkiraan area prospek geokimia (Gambar 12) didapatkan dengan melakukan *overlay* dari peta distribusi anomali temperatur, Hg, CO₂, dan pH. Kegiatan *overlay* juga dilakukan terhadap hasil penyelidikan sebelumnya karena

pada kegiatan penyelidikan ini area pengambilan data tanah hanya dilakukan pada area selatan mata air panas Bora. Dari hasil kompilasi data penyelidikan saat ini, area prospek geokimia hanya berupa *spot-spot* kecil yang tersebar di area munculnya manifestasi.



Gambar 12. Peta Area Prospek Berdasarkan data Geokimia Daerah Panas Bumi Bora-Pulu

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan data pengamatan lapangan, hasil analisis fluida, dan pengukuran udara tanah didapatkan beberapa kesimpulan yaitu:

- Sistem panas bumi daerah penyelidikan Bora-Pulu berasosiasi dengan aktivitas tektonik-magmatik.
- Sistem panas bumi terbagi menjadi sistem panas bumi Bora, Mapane, Pulu, dan Mantikole.
- Sumber panas sistem panas bumi Bora dan Mapane diduga dari sisa magma ataupun batuan plutonik.
- Fluida sistem panas bumi Bora dan Mapane merupakan air klorida yang berasosiasi dengan air meteorik.

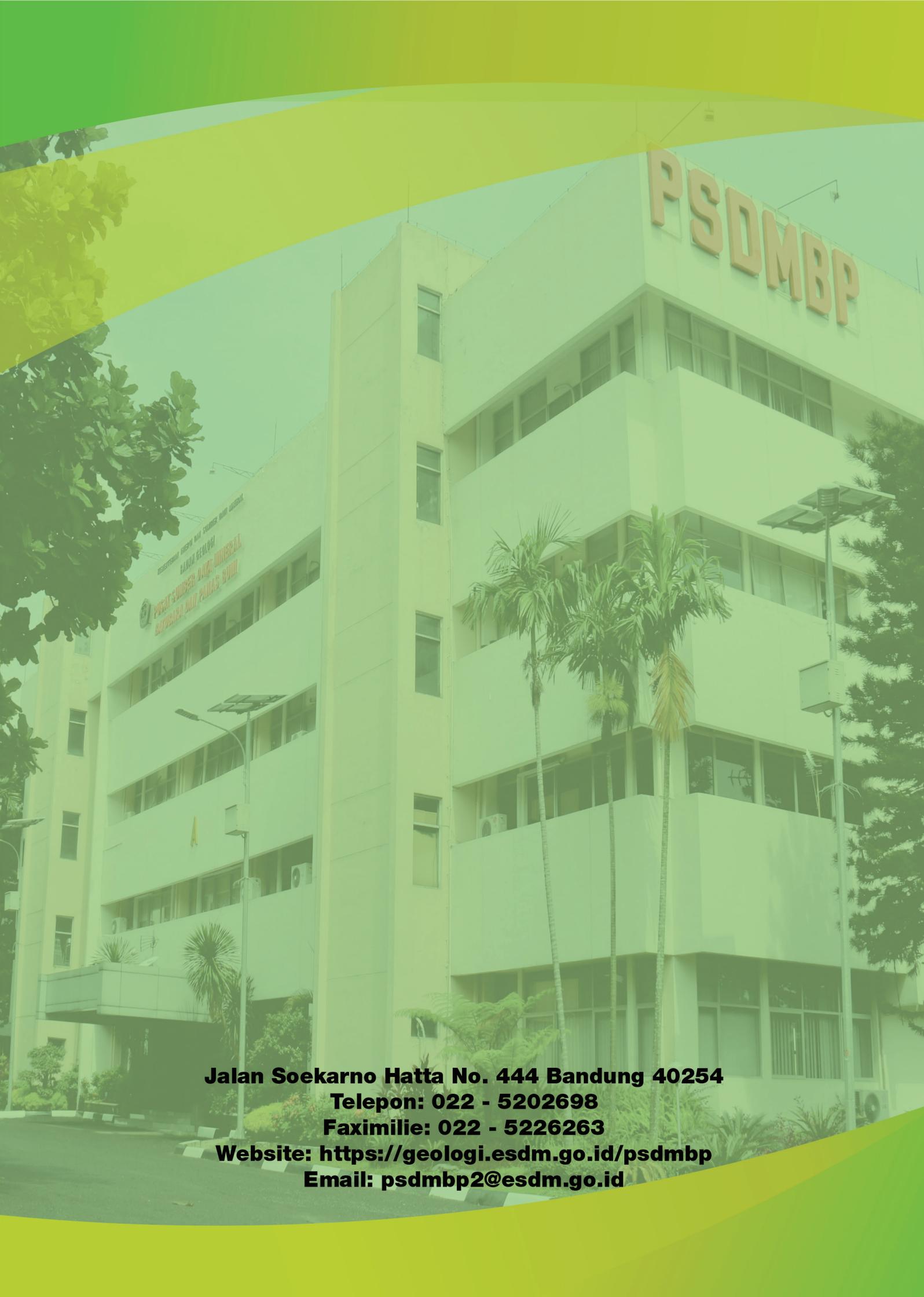
Sedangkan pada sistem Pulu dan Mantikole didominasi oleh air meteorik.

e) Perhitungan pendugaan temperatur bawah permukaan dapat dilakukan

pada sistem panas bumi Bora dan Mapane dengan temperatur bawah permukaan masing-masing 185 °C dan 220 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2010, Laporan Akhir Survei Terpadu Geologi dan Geokimia daerah Bora, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah, Pusat Sumber Daya Geologi.
- Anonim, 2003, Laporan Akhir Penyelidikan Terpadu Geologi, Geokimia dan Geofisika Daerah Panas Bumi Pulu, Kabupaten Donggala, Provinsi Sulawesi Tengah.
- Belgaman, Halda & Ichianagi, Kimpei & Tanoue, Masahiro & Suwarman, Rusmawan. (2016). Observational Research on Stable Isotopes in Precipitation over Indonesian Maritime Continent. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*. 46. 7-28. 10.4145/jahs.46.7.
- Nicholson, K., 1993, *Geothermal Fluids Chemistry & Exploration Technique*, Springer Verlag, In. Berlin.
- Phuong, N.K., dkk., 2012, *Water geochemistry and soil gas survey at Ungaran geothermal field, central Java, Indonesia*, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 229-230, pp 23–33.
- Risdianto, D., dan Kusnadi, D., 2010, *The Application of a Probability Graph in Geothermal Exploration*, Proc. World Geothermal Congress.
- Suryantini, 2013, *Statistical Analysis of Mercury Data from Soil Survey in Non-Volcanic Geothermal System: A Case Study in Sulawesi*, *Procedia Earth and Planetary Science* 6, pp 212 – 218.



Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254

Telepon: 022 - 5202698

Faximilie: 022 - 5226263

Website: <https://geologi.esdm.go.id/psdmbp>

Email: psdmbp2@esdm.go.id