



Analisis Potensi Panas Bumi Dengan Metode Deteksi Gas CO₂ Dalam Tanah Di Area Panas Bumi Tompaso

Theresa P. G. Selang^{#a}, Isri R. Mangangka^{#b}, Hendra Riogilang^{#c}

[#]Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^atheresaselang564@gmail.com, ^bisri.mangangka@unsrat.ac.id, ^criogilanghendra@gmail.com

Abstrak

Indonesia memiliki potensi panas bumi yang besar, salah satunya berada di Lapangan Panas Bumi Tompaso, Sulawesi Utara. Pengembangan panas bumi memerlukan tahapan eksplorasi yang akurat untuk mendelineasi zona aliran fluida panas bumi bawah permukaan, terutama dalam penentuan lokasi pengeboran sumur produksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi panas bumi di area Tompaso dengan menggunakan metode deteksi gas karbon dioksida (CO₂) dalam tanah sebagai indikator aktivitas hidrotermal. Penelitian dilakukan di Desa Sendangan dengan pendekatan integratif yang mengombinasikan data geologi, struktur, geofisika, dan geokimia. Pengukuran konsentrasi CO₂ dilakukan menggunakan gas *detector tube* Komyo-Kitagawa pada kedalaman sekitar 60 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi gas CO₂ membentuk pola anomali yang terkontrol oleh struktur patahan berarah NW-SE. Zona dengan konsentrasi CO₂ tinggi diinterpretasikan sebagai area upflow fluida panas bumi dan direkomendasikan sebagai lokasi prospek pengeboran. Metode deteksi gas CO₂ terbukti efektif sebagai pendekatan eksplorasi awal yang efisien dan berbiaya relatif rendah.

Kata kunci: panas bumi, gas CO₂ tanah, Tompaso, eksplorasi panas bumi, zona upflow

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia karena posisinya yang berada pada zona tektonik aktif dan jalur gunung api dunia. Keberadaan jalur vulkanik aktif tersebut menyebabkan Indonesia memiliki banyak sistem panas bumi yang tersebar luas di berbagai wilayah. Potensi panas bumi ini menjadikan Indonesia sebagai negara yang memiliki peluang besar dalam pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pemanfaatan panas bumi dinilai strategis karena mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu dengan emisi karbon yang relatif rendah dibandingkan sumber energi fosil.

Salah satu wilayah yang memiliki potensi panas bumi cukup besar adalah Lapangan Tompaso yang terletak di Kabupaten Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara. Lapangan ini termasuk dalam Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Lahendong-Tompaso yang secara geologis berasosiasi dengan zona subduksi ganda serta aktivitas gunung api aktif. Kondisi geologi tersebut menjadikan kawasan Tompaso sebagai daerah yang prospektif untuk pengembangan energi panas bumi. WKP Lahendong-Tompaso memiliki dua wilayah pengembangan utama, yaitu PLTP Lahendong Unit I-IV yang berada di Kota Tomohon dan Kabupaten Minahasa, serta PLTP Tompaso Unit V-VI yang berada di wilayah Minahasa.

Hingga saat ini, kapasitas terpasang PLTP Lahendong Unit I-V telah mencapai sekitar 100 MW dan direncanakan akan ditambah sebesar 20 MW melalui pengembangan Unit VI, sehingga total kapasitas terpasang di wilayah ini diproyeksikan mencapai 120 MW. PLTP Tompaso yang terdiri dari Unit V dan Unit VI telah beroperasi secara komersial sejak tahun 2012 dengan kapasitas masing-masing unit sebesar 20 MW. Operasional pembangkit tersebut didukung oleh delapan sumur pemboran yang telah dibangun sejak tahun 2008. Secara keseluruhan, PLTP Lahendong dan Tompaso telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penyediaan energi listrik di Provinsi Sulawesi Utara, yaitu sekitar 60% dari total kebutuhan listrik regional.

Sebagai sumber energi terbarukan, panas bumi memiliki berbagai keunggulan

dibandingkan sumber energi konvensional. Keunggulan tersebut antara lain adalah emisi gas rumah kaca yang rendah serta sistem pengelolaan limbah yang relatif ramah lingkungan melalui proses reinjeksi fluida produksi kembali ke dalam reservoir. Pemanfaatan panas bumi sejalan dengan kebijakan energi nasional yang tertuang dalam Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 serta Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2010–2025, di mana panas bumi ditargetkan memberikan kontribusi sebesar 6,3% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025.

Meskipun memiliki potensi yang besar, pengembangan energi panas bumi menghadapi berbagai tantangan, terutama pada tahap eksplorasi. Tahap eksplorasi merupakan fase krusial karena berkaitan langsung dengan penentuan lokasi sumur produksi. Kesalahan dalam proses eksplorasi dan penentuan titik pengeboran dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang sangat besar, mengingat biaya pengeboran panas bumi tergolong tinggi. Oleh karena itu, diperlukan metode eksplorasi yang tepat, efisien, dan akurat untuk mendeliniasi area yang memiliki potensi aliran fluida panas bumi bawah permukaan (Chiodini et al., 1998).

Salah satu metode eksplorasi yang dapat digunakan adalah survei gas tanah dengan mengukur konsentrasi gas karbon dioksida (CO_2) dalam tanah. Gas CO_2 merupakan salah satu gas dominan yang berasosiasi dengan sistem panas bumi dan dapat bermigrasi dari reservoir menuju permukaan melalui rekahan, sesar, atau zona permeabel lainnya. Keberadaan gas CO_2 dalam tanah sering kali menjadi indikator adanya aliran fluida panas bumi dari bawah permukaan (Saptadji, 2015). Oleh karena itu, pengukuran konsentrasi CO_2 dapat digunakan sebagai pendekatan untuk mengidentifikasi dan mendeliniasi zona prospek panas bumi.

Pengukuran gas CO_2 dalam tanah umumnya dilakukan setelah area target dianalisis melalui pendekatan geologi, geofisika, dan geokimia. Data konsentrasi CO_2 yang diperoleh kemudian dipetakan secara spasial untuk mengidentifikasi anomali yang mengindikasikan keberadaan jalur aliran fluida panas bumi. Peta distribusi CO_2 ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan lokasi pengeboran sumur produksi, sehingga dapat meningkatkan peluang keberhasilan eksplorasi serta meminimalkan risiko kegagalan pengeboran.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mendeliniasi area yang memiliki potensi aliran fluida panas bumi di Lapangan Tompaso dengan menggunakan metode deteksi gas CO_2 dalam tanah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode eksplorasi panas bumi yang lebih efektif dan efisien. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pendukung dalam pengambilan keputusan eksplorasi panas bumi yang berkelanjutan, khususnya di kawasan Tompaso yang memiliki peran penting sebagai salah satu penyedia energi bersih di Provinsi Sulawesi Utara.

2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan di area panas bumi Tompaso dengan fokus pengamatan di Desa Sendangan, Kecamatan Kawangkoan, Kabupaten Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara. Lokasi ini dipilih karena secara geologis merupakan wilayah vulkanik aktif yang berasosiasi dengan zona subduksi dan aktivitas gunung api, sehingga berpotensi memiliki aliran fluida panas bumi yang signifikan. Desa Sendangan diperkirakan sebagai zona upflow berdasarkan karakteristik hidrologi dan geokimia. Pengukuran lapangan dilakukan pada 8 November 2025 yang meliputi survei lokasi, penentuan titik pengukuran, pengambilan data konsentrasi gas CO_2 dalam tanah, serta pencatatan parameter pendukung lapangan.

Metode penelitian menggunakan pendekatan integratif dengan memanfaatkan data geologi, struktur, geofisika, dan geokimia yang telah tersedia sebagai dasar interpretasi. Analisis geologi dan struktur digunakan untuk mengidentifikasi jalur rekahan dan sesar yang berperan sebagai media aliran fluida panas bumi. Data geofisika magnetotellurik dan geokimia air panas bumi yang diperoleh dari penelitian sebelumnya digunakan untuk memperkirakan zona *outflow* dan *upflow* sistem panas bumi. Dalam penelitian ini, pengukuran gas CO_2 dalam tanah digunakan sebagai indikator utama keberadaan aliran fluida panas bumi bawah permukaan.

Pengukuran konsentrasi gas CO₂ dilakukan secara langsung menggunakan gas detector tube CO₂ merek Komyo–Kitagawa yang bekerja berdasarkan prinsip perubahan warna akibat reaksi kimia. Sampel gas tanah diambil pada kedalaman sekitar 60 cm dengan diameter lubang 5 cm menggunakan pipa stainless steel. Udara tanah diambil dengan satu kali tarikan pompa Kitagawa sesuai volume standar, kemudian konsentrasi CO₂ dibaca langsung pada skala tabung dalam satuan persen. Setiap hasil pengukuran dicatat bersama dengan koordinat GPS, suhu tanah, dan kondisi lingkungan sebagai data pendukung. Pengukuran yang menunjukkan hasil tidak normal atau tidak merata dikeluarkan dari analisis (Hernandez et al., 2001).

Data hasil pengukuran CO₂ dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata, simpangan baku, serta nilai maksimum dan minimum guna mengidentifikasi anomali gas tanah. Selanjutnya, analisis spasial dilakukan dengan metode interpolasi menggunakan perangkat lunak GIS untuk menghasilkan peta sebaran konsentrasi CO₂. Hasil pemetaan kemudian dikorelasikan dengan data geologi, struktur, dan geofisika untuk mendeliniasi zona potensial aliran fluida panas bumi. Zona dengan konsentrasi CO₂ tinggi dan keterkaitan struktural yang kuat diinterpretasikan sebagai area prospek dan direkomendasikan sebagai lokasi prioritas pengeboran sumur produksi.

3. Kajian Literatur

3.1 Konsep dan Karakteristik Panas Bumi

Energi panas bumi (*geothermal energy*) merupakan energi panas alami yang tersimpan di dalam bumi dan berasal dari proses geologi internal yang berlangsung sejak terbentuknya bumi hingga saat ini. Sumber utama panas bumi berasal dari panas sisa pembentukan bumi (*primordial heat*) serta panas yang dihasilkan oleh peluruhan radioaktif unsur uranium, thorium, dan kalium di dalam kerak dan mantel bumi. Panas tersebut kemudian berpindah ke arah permukaan melalui mekanisme konduksi dan konveksi, terutama melalui batuan yang memiliki rekahan dan zona permeabel (Dickson & Fanelli, 2003).

Secara konseptual, sistem panas bumi terbentuk akibat interaksi antara sumber panas di kedalaman umumnya berupa intrusi magma atau batuan panas dengan fluida bawah permukaan serta batuan reservoir yang memiliki porositas dan permeabilitas yang memadai. Interaksi ini membentuk sistem hidrotermal yang memungkinkan fluida panas bersirkulasi dan mengantarkan energi termal ke arah permukaan (Hochstein & Hunt, 1970). Keberadaan sistem ini sering ditandai oleh manifestasi permukaan seperti mata air panas, fumarol, geyser, lumpur panas, serta zona alterasi hidrotermal. Namun, pada sistem panas bumi tersembunyi (*hidden geothermal system*), manifestasi permukaan dapat sangat terbatas sehingga identifikasi sistem panas bumi memerlukan pendekatan geokimia dan geofisika (Chioldini et al., 1998).

Panas bumi diklasifikasikan sebagai energi terbarukan karena sumber panasnya berasal dari proses geologi alami yang berlangsung secara kontinu. Selain itu, panas bumi bersifat *baseload energy*, yaitu mampu menyediakan energi secara stabil dan terus-menerus tanpa dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, pembangkit listrik tenaga panas bumi memiliki tingkat emisi gas rumah kaca yang jauh lebih rendah, sehingga berkontribusi positif terhadap upaya mitigasi perubahan iklim (IEA, 2017).

3.2 Potensi Panas Bumi di Indonesia dan Wilayah Tompaso

Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia karena letaknya pada jalur *Pacific Ring of Fire*, yang dicirikan oleh aktivitas tektonik dan vulkanik tinggi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral memperkirakan potensi panas bumi Indonesia mencapai lebih dari 29.000 MW, namun tingkat pemanfaatannya masih relatif rendah dibandingkan total potensi yang tersedia (KESDM, 2023). Oleh karena itu, panas bumi dipandang sebagai salah satu pilar utama pengembangan energi baru dan terbarukan nasional (Suryantoro et al., 2020).

Wilayah Tompaso di Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara, merupakan bagian dari Wilayah Kerja Panas Bumi Lahendong–Tompaso yang memiliki potensi panas bumi signifikan. Sistem panas bumi di wilayah ini bertipe *liquid-dominated reservoir* dengan temperatur reservoir berkisar antara 200–300°C, serta didukung oleh manifestasi permukaan berupa mata air panas,

fumarol, dan zona alterasi hidrotermal (Hochstein & Sudarman, 2008). Keberadaan struktur geologi aktif seperti sesar dan rekahan berperan penting sebagai jalur migrasi fluida panas bumi dari reservoir ke permukaan (Saptadji, 2015).

3.3 Gas CO₂ dalam Tanah sebagai Indikator Sistem Panas Bumi

Keberadaan gas dalam tanah merupakan salah satu respons alami dari aktivitas panas bumi di bawah permukaan. Dalam sistem panas bumi, sumber panas (*heat source*) yang berasal dari intrusi magma atau batuan bersuhu tinggi memanaskan batuan dan fluida di sekitarnya, sehingga membentuk sistem hidrotermal aktif (Koga, 1984). Proses pemanasan ini menyebabkan pelepasan gas-gas volatil yang terlarut dalam fluida panas bumi, kemudian bermigrasi ke arah permukaan melalui jalur rekahan, patahan, dan zona permeabel pada batuan.

Karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu gas vulkanik utama yang paling umum dijumpai dalam sistem panas bumi. Gas ini memiliki mobilitas tinggi dan stabilitas kimia yang baik, sehingga mampu bermigrasi dari reservoir panas bumi menuju lapisan tanah dangkal dan terakumulasi di pori-pori tanah. Konsentrasi CO₂ yang relatif tinggi di dalam tanah sering dikaitkan dengan keberadaan jalur migrasi fluida panas bumi dan aktivitas sistem hidrotermal di kedalaman (Chiodini et al., 1998).

Distribusi CO₂ dalam tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, seperti tingkat permeabilitas batuan, keberadaan struktur patahan, tekanan fluida, serta suhu bawah permukaan. Selain itu, faktor lingkungan seperti kelembaban tanah dan suhu permukaan juga dapat memengaruhi pola sebaran gas. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika gas CO₂ dalam tanah menjadi penting dalam eksplorasi panas bumi, khususnya untuk mengidentifikasi zona-zona aktif yang berasosiasi dengan aliran fluida panas bumi (*upflow zones*) (Mazot et al., 2008).

3.4 Metode Deteksi Gas CO₂ dalam Tanah untuk Eksplorasi Panas Bumi

Metode deteksi gas karbon dioksida dalam tanah merupakan pendekatan geokimia non-invasif yang banyak digunakan dalam eksplorasi panas bumi modern. Prinsip dasar metode ini adalah mengukur konsentrasi CO₂ yang terakumulasi di pori-pori tanah sebagai indikator adanya aliran fluida panas bumi dari reservoir ke permukaan. Pengukuran dilakukan pada kedalaman tertentu untuk meminimalkan pengaruh atmosfer dan aktivitas biologis permukaan (Hernandez et al., 2001).

Metode ini sangat relevan diterapkan pada wilayah panas bumi yang memiliki manifestasi permukaan terbatas atau tidak jelas. Pada kondisi tersebut, gas CO₂ sering kali menjadi satu-satunya petunjuk geokimia yang dapat diamati secara langsung di lapangan. Nilai konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan latar belakang (*background*) umumnya diinterpretasikan sebagai anomali geokimia yang merepresentasikan jalur migrasi fluida panas bumi (Chiodini et al., 2001).

Data hasil pengukuran CO₂ kemudian dianalisis secara spasial untuk memetakan pola distribusi gas di area penelitian. Peta sebaran ini dapat menunjukkan zona dengan intensitas emisi CO₂ tinggi, sedang, dan rendah, yang selanjutnya digunakan untuk mendelineasi area prospek panas bumi. Integrasi data gas CO₂ dengan informasi geologi dan geofisika, seperti peta struktur patahan dan data resistivitas, dapat meningkatkan akurasi interpretasi sistem panas bumi bawah permukaan (Grant & Bixley, 2011).

3.5 Pentingnya Deliniasi Area Upflow Fluida Panas Bumi

Deliniasi area *upflow* fluida panas bumi merupakan tahapan krusial dalam eksplorasi dan pengembangan lapangan panas bumi. Area *upflow* adalah zona di mana fluida panas dari reservoir naik ke arah permukaan melalui jalur rekahan dan patahan, membawa energi panas dengan temperatur dan tekanan yang relatif tinggi. Zona ini menjadi target utama dalam penentuan lokasi pengeboran sumur produksi karena memiliki peluang terbesar untuk menghasilkan fluida panas bumi yang layak dimanfaatkan (Hochstein & Hunt, 1970).

Tanpa deliniasi area *upflow* yang akurat, kegiatan pengeboran berisiko dilakukan pada zona *outflow* atau *recharge*, yang umumnya memiliki temperatur lebih rendah dan tidak ekonomis untuk pembangkitan energi. Kesalahan dalam penentuan lokasi pengeboran dapat mengakibatkan

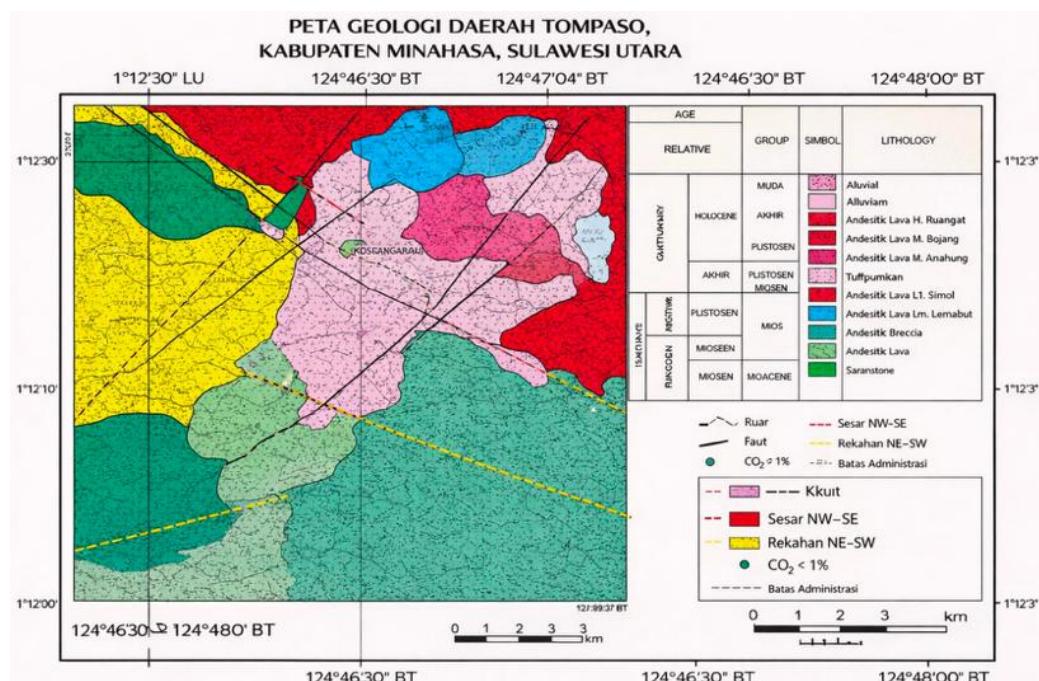
kerugian finansial yang besar mengingat biaya eksplorasi panas bumi yang sangat tinggi. Oleh karena itu, deliniasi *upflow* menjadi langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi eksplorasi dan menurunkan risiko kegagalan pengeboran.

Metode deteksi gas CO₂ dalam tanah berperan penting dalam proses deliniasi area *upflow* karena gas cenderung bermigrasi mengikuti jalur permeabilitas yang sama dengan fluida panas bumi. Konsentrasi CO₂ yang tinggi dan terdistribusi secara linier sering berasosiasi dengan keberadaan patahan atau rekahan aktif yang berfungsi sebagai jalur aliran fluida. Dengan mengintegrasikan hasil survei gas CO₂ dengan data geologi dan geofisika, area *upflow* dapat diidentifikasi secara lebih komprehensif dan akurat (Chiodini et al., 1998).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Kondisi Geologi dan Struktur Pengontrol Sistem Panas Bumi Tompaso

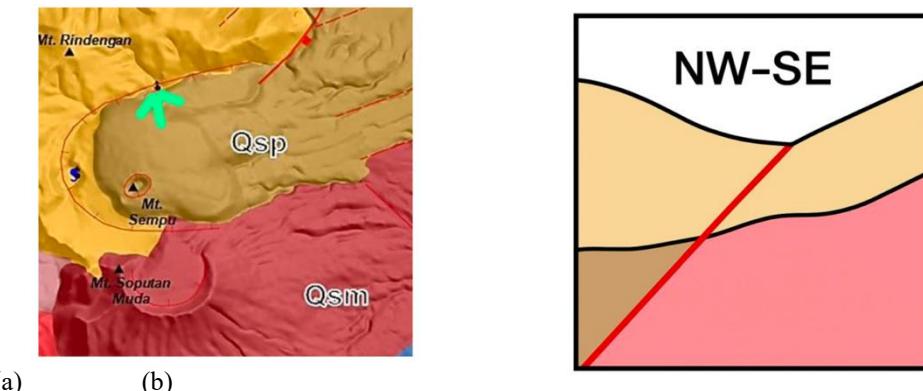
Hasil kajian geologi menunjukkan bahwa wilayah panas bumi Tompaso berada pada lingkungan geologi vulkanik aktif yang sangat dipengaruhi oleh keberadaan struktur patahan regional. Kondisi geologi ini memiliki peran yang sangat penting dalam mengontrol sistem panas bumi, khususnya dalam menyediakan jalur permeabilitas bagi migrasi fluida hidrotermal dari reservoir menuju permukaan. Keberadaan batuan vulkanik muda yang masih aktif secara tektonik, dikombinasikan dengan struktur patahan yang berkembang baik, menjadikan wilayah ini prospektif sebagai sistem panas bumi bertipe *liquid-dominated system* (Hochstein & Sudarman, 2008). Secara regional, kondisi litologi dan struktur geologi wilayah penelitian ditunjukkan pada Peta Geologi, yang memperlihatkan sebaran satuan batuan vulkanik serta keberadaan struktur patahan utama yang memotong area penelitian.



Gambar 1. Peta Geologi

Salah satu struktur dominan yang berkembang di wilayah penelitian adalah sesar berarah barat laut-tenggara (NW–SE) yang diinterpretasikan sebagai jalur utama aliran fluida panas bumi karena sejajar dengan arah tegasan regional dan menunjukkan indikasi aktivitas tektonik yang relatif masih aktif. Keberadaan struktur ini, sebagaimana ditunjukkan pada *Gambar Sesar NW–SE*, memperlihatkan hubungan yang erat antara kelurusian sesar dan distribusi satuan batuan vulkanik di sekitarnya, yang berperan dalam meningkatkan permeabilitas batuan. Kondisi tersebut memungkinkan fluida panas bumi beserta gas terlarut bermigrasi secara vertikal dari reservoir menuju permukaan melalui zona rekahan yang berkembang akibat aktivitas sesar (Grant & Bixley, 2011). Dengan demikian, sesar NW–SE menjadi faktor pengontrol utama sistem panas

bumi Tompaso dan berkontribusi signifikan dalam pembentukan zona upflow, dibandingkan area yang relatif jauh dari pengaruh struktur patahan utama.



Gambar 2. (a) Sesar NW–SE; (b) Gambar Skematik Sesar NW–SE

Secara konseptual, mekanisme kerja sesar NW–SE sebagai jalur migrasi fluida panas bumi ditunjukkan melalui *Gambar skematik sesar NW–SE*. Skema ini menggambarkan bagaimana fluida panas dari reservoir bermigrasi ke atas melalui zona rekahan yang berkembang akibat aktivitas sesar, sekaligus menjelaskan hubungan antara struktur geologi dan dinamika fluida hidrotermal di bawah permukaan. Rekahan yang terbentuk akibat pergerakan sesar meningkatkan permeabilitas batuan, sehingga memungkinkan fluida panas dan gas terlarut, seperti CO₂, bergerak secara vertikal maupun lateral menuju lapisan yang lebih dangkal.

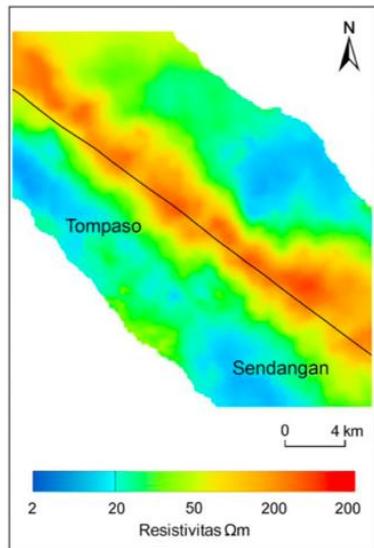
Keberadaan struktur ini sejalan dengan teori sistem panas bumi yang menyatakan bahwa patahan dan rekahan batuan berfungsi sebagai *conduit* utama bagi aliran fluida hidrotermal (Grant & Bixley, 2011). Dengan demikian, area di sekitar sesar NW–SE memiliki potensi yang lebih besar untuk berkembang sebagai zona *upflow*, dibandingkan area yang relatif jauh dari pengaruh struktur utama, karena jalur permeabilitas yang terbentuk bersifat lebih kontinu dan efektif dalam menyalurkan fluida panas dari reservoir ke permukaan.

4.2 Karakteristik Sistem Panas Bumi Berdasarkan Data Geofisika

Selain dikontrol oleh kondisi geologi, sistem panas bumi Tompaso juga menunjukkan karakteristik geofisika yang mendukung keberadaan reservoir panas bumi di bawah permukaan. Data geofisika dimanfaatkan untuk mengidentifikasi zona dengan sifat fisik batuan yang mencerminkan keberadaan fluida panas, alterasi hidrotermal, serta keberadaan batuan penudung (*cap rock*) yang berperan dalam menjaga sistem panas bumi tetap tertutup.

Hasil interpretasi Peta Resistivitas menunjukkan adanya zona resistivitas rendah yang diinterpretasikan sebagai area alterasi hidrotermal akibat interaksi intensif antara fluida panas bumi dan batuan sekitarnya. Zona resistivitas rendah ini umumnya berasosiasi dengan keberadaan mineral lempung hasil alterasi, yang berfungsi sebagai lapisan penudung sistem panas bumi dan menjadi ciri khas sistem hidrotermal aktif (Saptadji, 2015).

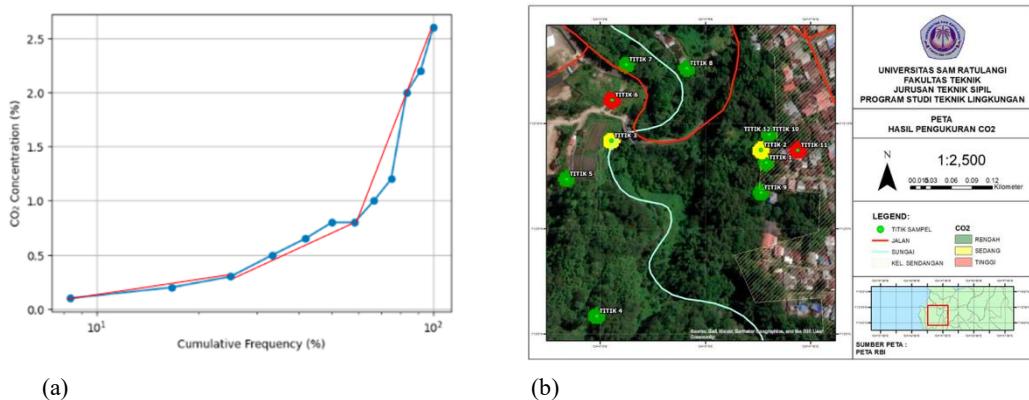
Selain data resistivitas, interpretasi Peta Zona Gayaberat dan Peta Magnetik memberikan indikasi tambahan mengenai keberadaan struktur bawah permukaan serta kontras densitas batuan yang berkaitan dengan sistem panas bumi. Anomali tertentu pada data gayaberat dan magnetik diinterpretasikan sebagai indikasi keberadaan intrusi batuan atau struktur geologi yang berperan sebagai sumber panas dan jalur aliran fluida panas bumi. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian panas bumi sebelumnya di wilayah Lahendong–Tompaso yang menyatakan bahwa kombinasi data geologi dan geofisika merupakan pendekatan yang efektif untuk memahami konfigurasi sistem panas bumi serta menentukan zona prospek yang paling potensial untuk pengembangan lebih lanjut (Hochstein & Sudarman, 2008).



Gambar 3. Peta Resistivitas

4.3 Distribusi dan Anomali Konsentrasi Gas CO₂ dalam Tanah

Hasil pengukuran gas CO₂ dalam tanah menunjukkan bahwa konsentrasi gas tidak tersebar secara homogen di seluruh area penelitian, melainkan membentuk pola tertentu yang mencerminkan kondisi sistem panas bumi di bawah permukaan. Distribusi frekuensi konsentrasi gas CO₂ ditampilkan pada Grafik Frekuensi Kumulatif CO₂, yang memperlihatkan adanya pemisahan yang cukup jelas antara nilai latar belakang (*background*) dan nilai anomali.



Gambar 4. (a) Grafik Frekuensi Kumulatif CO₂; (b) Gambar skematik sesar NW–SE Peta Pola Sebaran CO₂)
(Sumber: Data Penelitian, 2025)

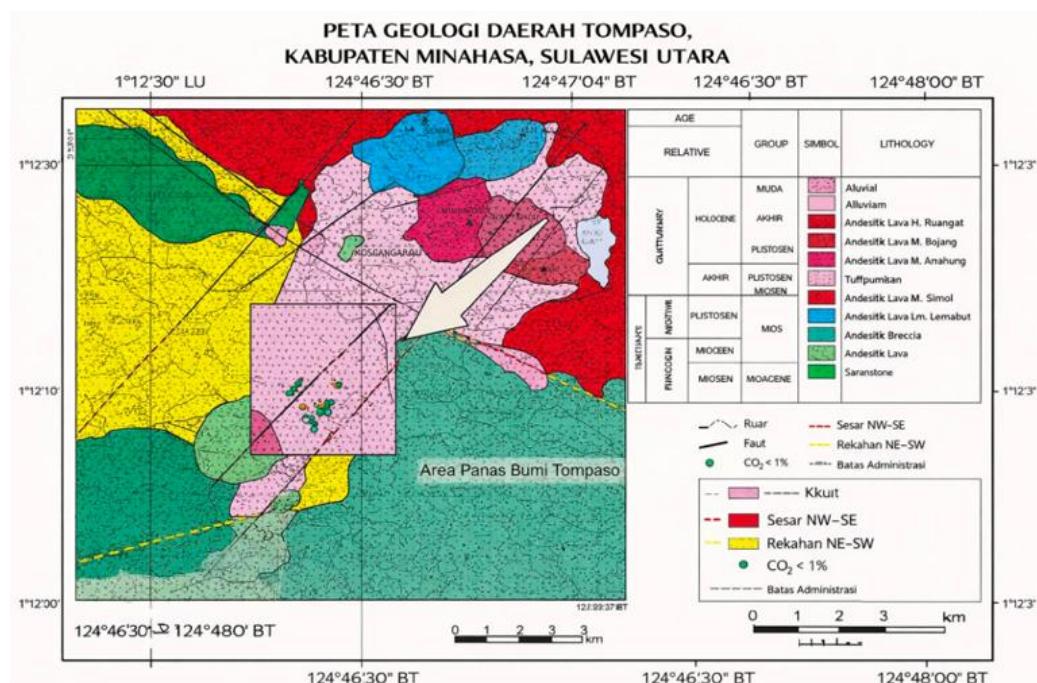
Berdasarkan grafik tersebut, nilai konsentrasi CO₂ yang berada di atas ambang tertentu diinterpretasikan sebagai anomali gas yang berkaitan dengan aktivitas hidrotermal. Anomali ini kemudian dipetakan secara spasial untuk memperoleh gambaran pola sebaran gas CO₂ di wilayah penelitian, sehingga dapat digunakan sebagai indikator awal keberadaan jalur aliran fluida panas bumi. Sebaran spasial konsentrasi gas CO₂ ditunjukkan pada Peta Pola Sebaran CO₂, yang memperlihatkan zona dengan intensitas CO₂ tinggi, sedang, dan rendah. Zona dengan konsentrasi tinggi umumnya berasosiasi dengan jalur struktur geologi utama dan diinterpretasikan sebagai area yang berada pada jalur migrasi fluida panas bumi dari kedalam menuju permukaan.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Chioldini et al. (1998) dan Mazot et al. (2008) yang menyatakan bahwa gas CO₂ merupakan indikator geokimia yang efektif untuk mendeteksi jalur aliran fluida panas bumi, terutama pada sistem panas bumi yang memiliki manifestasi permukaan terbatas atau tidak berkembang secara jelas.

4.4 Deliniasi Zona Potensi Fluida Panas Bumi Berdasarkan Integrasi Data

Integrasi antara data geologi, geofisika, dan geokimia gas tanah menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai sistem panas bumi di wilayah Tompaso. Deliniasi zona prospek dilakukan dengan menggabungkan pola struktur geologi, anomali resistivitas, serta sebaran konsentrasi gas CO₂ dalam tanah. Pendekatan integratif ini penting karena sistem panas bumi tidak dapat dijelaskan hanya oleh satu parameter tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai faktor bawah permukaan (Grant & Bixley, 2011).

Hasil integrasi data tersebut ditunjukkan pada Dealiniasi daerah penelitian, yang memperlihatkan pembagian zona berdasarkan tingkat potensi fluida panas bumi. Zona dengan potensi tinggi umumnya berasosiasi dengan konsentrasi gas CO₂ yang tinggi, berada di sekitar jalur sesar utama, serta beririsan dengan zona resistivitas rendah. Kondisi ini mengindikasikan adanya jalur permeabilitas yang memungkinkan fluida panas bumi bermigrasi dari reservoir menuju permukaan.



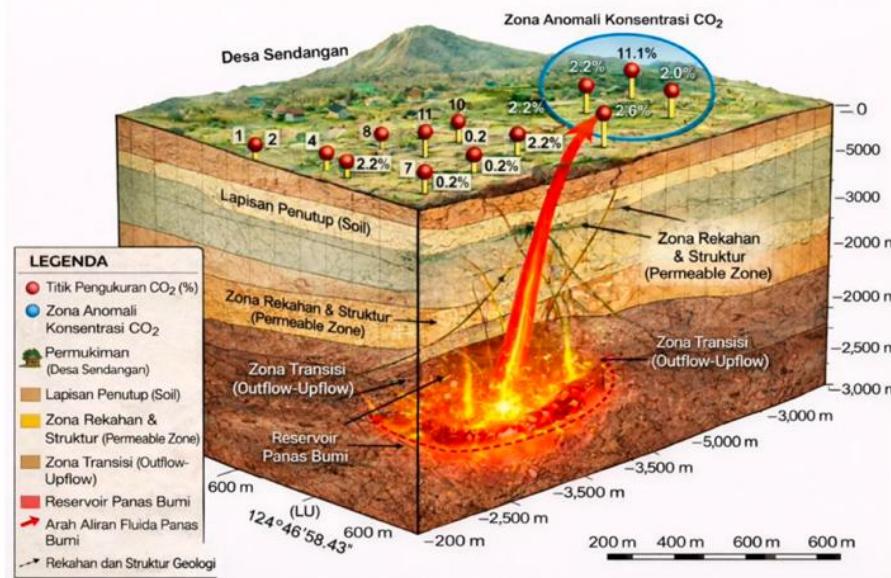
Gambar 5. Deliniasi Daerah Penelitian

Zona yang teridentifikasi sebagai area prospek utama berada pada bagian tertentu wilayah penelitian yang secara struktural dikontrol oleh sesar berarah NW–SE. Keberadaan sesar ini berperan sebagai jalur naiknya fluida (*upflow zone*), sehingga area di sekitarnya memiliki peluang lebih besar untuk dikembangkan sebagai lokasi pengeboran sumur produksi. Temuan ini sejalan dengan konsep eksplorasi panas bumi yang menyatakan bahwa zona *upflow* umumnya dicirikan oleh anomali geokimia dan struktur geologi yang intens (Hochstein & Hunt, 1970). Sebaliknya, zona dengan konsentrasi CO₂ rendah dan tidak berasosiasi dengan struktur utama diinterpretasikan sebagai area *outflow* atau *recharge*, yang memiliki temperatur dan tekanan fluida lebih rendah. Area ini dinilai kurang prospektif untuk pengeboran sumur produksi, namun tetap berperan penting dalam keseimbangan sistem panas bumi secara keseluruhan.

4.5 Interpretasi Konseptual Sistem Panas Bumi Tompaso

Berdasarkan seluruh hasil analisis yang telah dilakukan, disusun suatu model konseptual untuk menggambarkan sistem panas bumi di wilayah Tompaso. Model konseptual ini bertujuan untuk menjelaskan hubungan antara sumber panas, reservoir, jalur aliran fluida, serta manifestasi geokimia di permukaan. Penyusunan model konseptual merupakan tahap penting dalam eksplorasi panas bumi karena menjadi dasar dalam perencanaan pengembangan lapangan dan penentuan lokasi sumur produksi (Saptadji, 2015). Model konseptual sistem panas bumi Tompaso

ditunjukkan pada Konseptual Panas Bumi, yang menggambarkan sumber panas magmatik di kedalaman, reservoir panas bumi bertipe *liquid-dominated*, serta jalur aliran fluida yang dikontrol oleh struktur sesar. Fluida panas dari reservoir bermigrasi ke atas melalui zona rekahan dan patahan, membawa panas serta gas-gas seperti CO₂ yang kemudian terdeteksi di permukaan tanah.



Gambar 6. Konseptual Panas Bumi

Dalam model ini, zona *upflow* ditandai oleh konsentrasi gas CO₂ yang tinggi, resistivitas rendah, serta kedekatan dengan struktur sesar utama. Fluida yang telah kehilangan sebagian panasnya kemudian mengalir secara lateral membentuk zona *outflow* sebelum akhirnya bercampur dengan air meteoritik dan kembali ke sistem melalui proses *recharge*. Pola sirkulasi ini mencerminkan sistem hidrotermal yang dinamis dan berkelanjutan. Hasil interpretasi konseptual ini mendukung penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa gas CO₂ memiliki mobilitas tinggi dan mampu menjadi indikator awal keberadaan jalur fluida panas bumi, terutama pada sistem yang memiliki manifestasi permukaan terbatas (Mazot et al., 2008).

Dengan demikian, metode deteksi gas CO₂ dalam tanah terbukti efektif sebagai bagian dari pendekatan eksplorasi panas bumi yang efisien dan berbiaya relatif rendah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi metode geokimia gas tanah dengan data geologi dan geofisika mampu memberikan gambaran yang jelas mengenai zona prospek panas bumi di Tompaso. Temuan ini tidak hanya memperkuat pemahaman konseptual sistem panas bumi setempat, tetapi juga memberikan dasar ilmiah yang kuat dalam pengambilan keputusan teknis terkait eksplorasi dan pengembangan lapangan panas bumi secara berkelanjutan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis geologi, geokimia, serta keterkaitannya dengan struktur regional, dapat disimpulkan bahwa Desa Sendangan sebagai lokasi penelitian berada pada litologi batuan vulkanik muda hasil aktivitas gunung api yang bersifat porous dan intensif mengalami rekahan. Kondisi litologi tersebut dikontrol oleh sistem patahan berarah barat-laut-tenggara (NW-SE) yang berperan penting sebagai jalur utama migrasi fluida panas bumi dari reservoir menuju permukaan. Keberadaan struktur patahan ini menjadikan wilayah penelitian sebagai zona transisi dari outflow menuju upflow, sehingga secara alami mendukung pelepasan gas CO₂ ke permukaan tanah. Munculnya gas CO₂ di wilayah ini merupakan salah satu indikasi kuat adanya sistem panas bumi aktif yang masih berlangsung di bawah permukaan.

Hasil pengukuran konsentrasi gas CO₂ dalam tanah menunjukkan adanya tiga siklus peningkatan konsentrasi, yaitu S₁ (<0,5%), S₂ (1–1,2%), dan S₃ (2,2–2,6%), yang mencerminkan karakteristik manifestasi panas bumi aktif. Pola peningkatan ini mengindikasikan bahwa gas CO₂

yang terdeteksi bukan berasal dari proses biologis permukaan, melainkan berasosiasi langsung dengan aktivitas hidrotermal di kedalaman. Pemetaan sebaran spasial CO₂ memperlihatkan adanya zona anomali tinggi yang terfokus dan mengikuti arah struktur patahan NW–SE, sehingga memperkuat peran struktur tersebut sebagai jalur aliran fluida panas bumi. Berdasarkan hasil tersebut, area dengan konsentrasi CO₂ tertinggi di sekitar koordinat 1°12'09.48" dan 124°47'08.04" direkomendasikan sebagai lokasi paling prospektif untuk pengeboran sumur produksi panas bumi, karena merepresentasikan zona keluarnya fluida panas dari reservoir bawah permukaan dan memiliki potensi eksplorasi yang tinggi.

Referensi

- Chiodini, G., Frondini, F., & Raco, B. (1998). Diffuse emission of CO₂ from volcanic–hydrothermal systems. *Bulletin of Volcanology*, 60(1), 63–80.
- Chiodini, G., Frondini, F., Kerrick, D. M., Rogie, J., Parello, F., Peruzzi, L., & Zanzari, A. R. (2001). Quantification of deep CO₂ fluxes from central Italy. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 1907–1910.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: Utilization and technology*. Paris: UNESCO.
- Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). *Geothermal reservoir engineering* (2nd ed.). Oxford: Academic Press.
- Hernandez, P. A., Perez, N. M., Salazar, J. M. L., Nakai, S., Notsu, K., & Wakita, H. (2001). Diffuse emission of carbon dioxide from the Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3319–3322.
- Hochstein, M. P., & Hunt, T. M. (1970). Seismic, gravity and magnetic studies, Broadlands geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, Special Issue 2, 333–346.
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, 37(3), 220–266.
- International Energy Agency. (2017). *Renewables 2017: Analysis and forecasts to 2022*. Paris: IEA.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Potensi panas bumi Indonesia*. Jakarta: KESDM.
- Koga, A. (1984). The use of volatile constituents in geothermal fluids for geochemical prospecting in a geothermal area. *Research on Natural Energy*, 8, 349–358.
- Mazot, A., Bernard, A., Fischer, T., & Taran, Y. (2008). Diffuse soil degassing of CO₂ and H₂S at the Popocatépetl volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175(1–2), 114–120.
- Saptadji, N. M. (2015). *Teknik panas bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suryantoro, A., Widodo, S., & Prasetyo, A. (2020). Pengembangan panas bumi sebagai energi terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(2), 45–56.