

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama untuk menjawab tujuan penelitian mengenai sistem panas bumi di Sektor Candradimuka, Sileri, dan Sikidang, Dieng:

a. Kondisi Geologi Daerah Penelitian

Kondisi geologi daerah penelitian didominasi oleh produk vulkanik Kuartar yang membentuk satuan-satuan geomorfologi seperti kerucut vulkanik, dataran vulkanik, dan perbukitan vulkanik. Keberadaan dan lokasi manifestasi panas bumi di ketiga sektor secara signifikan dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar dan rekahan dengan arah dominan barat laut-tenggara (NW-SE) dan timurlaut-baratdaya (NE-SW). Struktur-struktur ini berfungsi sebagai jalur permeabel utama bagi sirkulasi fluida panas bumi dari kedalaman menuju ke permukaan. Stratigrafi daerah penelitian tersusun oleh sekuen batuan vulkanik yang dari tua ke muda terdiri dari produk andesitik Gunung Pangamunamun, Gunung Nagasari, Gunung Merdada dan Pagerkandang, yang ditutupi oleh endapan piroklastik jatuhnya termuda.

b. Karakteristik Hidrogeokimia dan Implikasinya

Terdapat dua sistem fluida utama yang teridentifikasi. Pertama, sistem acid-sulphate yang mencirikan manifestasi di permukaan pada Sektor Candradimuka, Sileri, dan Sikidang. Fluida ini bersifat asam (pH rendah) dan kaya akan sulfat, yang terbentuk dari proses kondensasi uap panas yang kaya gas H_2S (steam-heated) di lingkungan dangkal. Kedua, sistem neutral-alkali-chlorida yang diinterpretasikan sebagai fluida reservoir utama di kedalaman. Fluida ini diwakili oleh sampel outflow (D12) yang bersifat kaya klorida dan lebih matang. Analisis isotop Strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$) menunjukkan nilai yang rendah (~ 0.706), yang mengonfirmasi bahwa batuan reservoirnya adalah batuan vulkanik andesitik muda, dengan sumber Sr berasal dari pelarutan mineral plagioklas.

c. Model Konseptual Sistem Panas Bumi

Ketiga sektor penelitian (Candradimuka, Sileri, dan Sikidang) diinterpretasikan terhubung ke satu sistem reservoir utama yang sama di kedalaman yang berisi fluida tipe neutral-alkali-chlorida. Model konseptualnya adalah sistem panas bumi yang memiliki zonasi vertikal, di mana terjadi proses pendidihan di bagian atas reservoir. Fasa uap yang terpisah kemudian naik melalui jalur sesar dan membentuk tudung uap (steam cap) serta sistem acid-sulphate di atasnya, yang muncul di permukaan sebagai manifestasi kawah. Sistem ini memiliki zona upflow utama di bawah klaster kawah dan zona outflow lateral yang diwakili oleh mata air tipe klorida.

V.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang ditarik dari hasil analisis dan interpretasi data, serta menyadari adanya keterbatasan dalam penelitian ini, diajukan serangkaian saran yang terstruktur. Saran ini bertujuan untuk dua hal utama: (1) memperdalam pemahaman ilmiah terhadap sistem panas bumi di lokasi penelitian secara empiris, dan (2) memberikan panduan strategis yang logis dan terukur untuk kegiatan eksplorasi praktis di masa depan.

a. Saran untuk Penelitian Akademik Selanjutnya

Pertama, direkomendasikan untuk melakukan analisis struktur geologi kuantitatif yang jauh lebih mendalam di lapangan. Kegiatan ini tidak lagi hanya sebatas memvalidasi kelurusan dari citra satelit, melainkan fokus pada akuisisi data numerik yang esensial untuk memahami kontrol permeabilitas. Ini dicapai melalui pengukuran jurus dan kemiringan (strike/dip) sesar, kekar, serta vein secara sistematis. Analisis ini harus dilanjutkan dengan studi kinematik pada cermin sesar (slickenlines) untuk mengidentifikasi vektor dan tipe pergerakan yang paling efektif dalam menciptakan ruang terbuka bagi fluida. Sebagai pelengkap, analisis kerapatan rekahan (fracture density) pada singkapan-singkapan kunci akan membantu memetakan zona dengan potensi permeabilitas sekunder tertinggi. Untuk meningkatkan presisi dan skala analisis, teknologi modern seperti

fotogrametri menggunakan drone dapat dimanfaatkan untuk membangun model singkapan 3D beresolusi tinggi.

Kedua, penelitian selanjutnya harus mencakup karakterisasi geokimia fluida dan gas yang lebih komprehensif untuk mengungkap dinamika sistem secara utuh. Selain memperkuat data unsur konservatif seperti Li dan B, analisis perlu diperluas ke unsur jejak lain seperti Cesium (Cs) dan Rubidium (Rb) guna mempertajam interpretasi hubungan antar reservoir. Lebih krusial lagi adalah analisis komposisi gas terlarut dari manifestasi (CO_2 , H_2S , He, Ar, N_2) yang dapat mendeteksi input magmatik, mengestimasi temperatur reservoir yang lebih dalam, dan mengidentifikasi zona pendidihan. Langkah ini disempurnakan dengan analisis isotop, tidak hanya $\delta^{18}\text{O}$ dan δD untuk mengonfirmasi asal-usul air dan elevasi daerah resapan, tetapi juga isotop umur air seperti Tritium dan Karbon untuk mengestimasi waktu tinggal fluida, yang memberikan indikasi vital mengenai keberlanjutan sumber daya.

Ketiga, disarankan untuk melakukan analisis alterasi hidrotermal berbasis laboratorium yang lebih canggih untuk merekonstruksi sejarah termal sistem. Ini melibatkan identifikasi mineralogi kuantitatif menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk memastikan jenis mineral lempung (smektit, illit, klorit) yang merupakan indikator temperatur andal. Puncaknya adalah studi inklusi fluida (fluid inclusions) pada mineral sekunder seperti kuarsa. Analisis microthermometry pada inklusi ini akan memberikan data empiris langsung mengenai temperatur dan salinitas fluida purba yang pernah terperangkap, yang merupakan data validasi paling kuat untuk model temperatur bawah permukaan yang telah dibuat.

b. Saran untuk Aplikasi Praktis (Strategi Eksplorasi)

Langkah praktis pertama yang fundamental adalah pelaksanaan survei geofisika secara terintegrasi untuk memetakan arsitektur sistem panas bumi di bawah permukaan. Survei Magnetotellurik (MT) dengan desain stasiun yang rapat harus diprioritaskan di atas zona-zona prospektif untuk memetakan anomali resistivitas rendah yang mencirikan tudung lempung (clay cap) dan potensi reservoir di bawahnya. Secara bersamaan, survei gayabarat (gravity) harus

dilakukan untuk memetakan struktur densitas, seperti horst dan graben, yang seringkali menjadi kontrol struktur utama. Puncak dari upaya ini adalah sintesis seluruh data geologi, geokimia, MT, dan gravitasi ke dalam sebuah platform pemodelan 3D. Model terintegrasi ini adalah alat paling vital untuk memvisualisasikan target pengeboran secara spasial dan mengurangi risiko interpretasi.

Selanjutnya, strategi eksplorasi harus mengadopsi program pengeboran bertahap (phased drilling) untuk mengelola risiko dan biaya secara efektif. Sebelum berkomitmen pada sumur produksi yang mahal, direkomendasikan untuk mengebor beberapa sumur landaian suhu (TGH) atau slim hole pada lokasi dengan anomali geofisika paling meyakinkan. Tujuan utama tahap ini adalah untuk membuktikan keberadaan gradien termal komersial secara langsung dengan biaya yang relatif rendah. Hanya setelah data temperatur dari TGH berhasil mengonfirmasi model panas, maka keputusan untuk melanjutkan ke tahap pengeboran eksplorasi dalam yang menargetkan zona permeabel di kedalaman reservoir dapat diambil dengan tingkat keyakinan yang jauh lebih tinggi.

Sebagai langkah paralel yang menunjukkan pandangan jangka panjang, perlu dilakukan inisiasi pemantauan lingkungan dan reservoir baseline sejak dini. Ini merupakan fondasi krusial untuk pengembangan proyek yang berkelanjutan dan bertanggung jawab. Kegiatan ini mencakup program pemantauan kualitas dan muka air tanah di sekitar area proyek untuk mendeteksi potensi dampak hidrologis. Selain itu, pemasangan jaringan seismometer mikro diperlukan untuk memantau aktivitas tektonik lokal, sementara penggunaan data satelit InSAR dapat melacak deformasi permukaan (subsistensi atau pengangkatan) sekecil apapun. Membangun data dasar ini sebelum eksploitasi dimulai sangat penting untuk manajemen risiko dan operasional di masa depan.