



Identifikasi Zona Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis HVSR di Sekitar Nagari Malampah

Aura Puja Kesuma Andily¹, Akmam Akmam^{2*}, Hamdi Rifai³, Zulhendra⁴

¹⁻⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: akmam_db@fmipa.unp.ac.id

Abstract. Nagari Malampah, Tigo Nagari District, Pasaman Regency, West Sumatra, is located in a volcanic and tectonic environment that supports the development of a geothermal system. Information regarding the distribution of relatively more prospective areas in the region remains limited. This study aims to estimate the distribution of geothermal prospect zones using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method based on microtremor data from 16 measurement points. HVSR analysis provides the dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0) parameters. These parameters were integrated using a scoring system based on their respective classes to determine relatively low, moderate, and high prospect zones. The analysis indicates that the relatively high prospect zones are located at measurement points T5, T6, T8, and T10. These results indicate variations in site response and subsurface impedance contrasts that are relatively more supportive of geothermal prospects at several locations. This interpretation represents an initial indication of geothermal prospectivity and cannot be used to directly confirm the presence of hydrothermal fluids. Further validation is required using geological, geochemical, resistivity, magnetotelluric (MT), or other exploration data.

Keywords: Amplification Factor; Dominant Frequency; Geothermal Energy; HVSR; Microtremor.

Abstrak. Nagari Malampah, Kecamatan Tigo Nagari, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat, berada pada lingkungan vulkanik dan tektonik yang mendukung terbentuknya sistem panas bumi. Informasi mengenai distribusi wilayah yang relatif lebih prospektif di daerah tersebut masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengestimasi distribusi zona prospek panas bumi menggunakan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSR) berdasarkan data mikrotremor pada 16 titik pengukuran. Analisis HVSR menghasilkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Parameter tersebut diintegrasikan melalui sistem scoring berdasarkan kelas dan untuk menentukan zona prospek relatif rendah, sedang, dan tinggi. Hasil analisis menunjukkan bahwa zona prospek relatif tinggi terdapat pada titik T5, T6, T8, dan T10. Hasil tersebut menunjukkan adanya variasi respons situs dan kontras impedansi bawah permukaan yang relatif lebih mendukung pada beberapa lokasi. Interpretasi ini merupakan indikasi awal prospek panas bumi dan tidak dapat digunakan untuk membuktikan keberadaan fluida hidrotermal secara langsung. Validasi lebih lanjut diperlukan melalui data geologi, geokimia, resistivitas, magnetotellurik (MT), atau metode eksplorasi lainnya.

Kata Kunci: Faktor Amplifikasi; Frekuensi Dominan; HVSR; Mikrotremor; Panas Bumi.

1. LATAR BELAKANG

Secara administratif, Nagari Malampah, Kecamatan Tigo Nagari, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat, berada pada jajaran Perbukitan Barisan yang dipengaruhi aktivitas vulkanik Gunung Talamau dan Sistem Sesar Sumatra. Interaksi proses vulkanik dan tektonik membentuk keragaman litologi serta struktur geologi yang dapat berperan dalam mengontrol kondisi bawah permukaan dan sirkulasi fluida pada sistem panas bumi (Kasbani, 2008; Badan Geologi, 2022; Moeck, 2014). Berdasarkan Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping, kawasan kajian didominasi oleh batuan vulkanik berumur Kuartar (Rock et al., 1983). Keberadaan manifestasi panas bumi di Nagari Malampah semakin memperkuat perlunya kajian pendahuluan untuk memperoleh informasi mengenai wilayah yang relatif lebih prospektif dan dapat diprioritaskan pada tahap eksplorasi berikutnya.

Panas bumi merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari energi panas di dalam bumi dan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Pengembangan sumber daya panas bumi memerlukan tahapan eksplorasi yang dilakukan secara bertahap, mulai dari survei pendahuluan hingga eksplorasi yang lebih rinci. Pada tahap awal, informasi mengenai kondisi geologi dan respons bawah permukaan diperlukan untuk memperkirakan wilayah yang perlu diprioritaskan untuk penyelidikan lebih lanjut (Grant & Bixley, 2011; Hochstein & Sudarman, 2008). Oleh karena itu, metode geofisika yang dapat memberikan informasi awal mengenai variasi kondisi bawah permukaan menjadi penting dalam mendukung proses eksplorasi.

Salah satu metode geofisika pasif yang dapat digunakan pada tahap pendahuluan adalah *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Metode ini memanfaatkan rekaman mikrotremor tiga komponen untuk memperoleh respons spektral bawah permukaan dan tidak memerlukan sumber getaran buatan (Nakamura, 1989; SESAME, 2004; Molnar et al., 2022). Analisis HVSR menghasilkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Frekuensi dominan berkaitan dengan respons resonansi yang dipengaruhi oleh kondisi dan kontras sifat lapisan bawah permukaan, sedangkan faktor amplifikasi menggambarkan penguatan respons spektral akibat kontras impedansi. Kedua parameter tersebut dapat digunakan sebagai informasi pendukung untuk mengidentifikasi variasi kondisi bawah permukaan, tetapi tidak dapat secara langsung membuktikan keberadaan fluida hidrotermal.

Penerapan HVSR pada wilayah Sumatera Barat telah dilakukan untuk berbagai tujuan. Wulandari et al. (2020), misalnya, menggunakan metode HVSR di Painan untuk memperoleh informasi frekuensi dominan, amplifikasi, V_{s30} , dan PGA sebagai dasar mikrozonasi bahaya gempabumi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa HVSR dapat digunakan untuk mengkarakterisasi respons dan variasi kondisi bawah permukaan. Pada lingkungan panas bumi, Marbun dan Pohan (2024) menerapkan metode mikrotremor pada mata air panas Bukit Kili dan Garara, Kabupaten Solok, dan memperoleh nilai f_0 masing-masing sebesar 0,65 Hz dan 0,75 Hz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa HVSR dapat memberikan informasi awal mengenai respons bawah permukaan pada kawasan yang memiliki manifestasi panas bumi. Namun, interpretasi panas bumi akan lebih kuat apabila dikombinasikan dengan informasi manifestasi, geokimia, atau metode geofisika lainnya.

Selain penelitian tersebut, kajian terbaru di Nagari Malampah oleh Rahmania et al. (2026) telah menggunakan mikrotremor untuk mengestimasi indeks kerentanan seismik. Penelitian tersebut berfokus pada karakterisasi respons situs yang berkaitan dengan kerentanan terhadap gempabumi, sehingga belum secara khusus membahas distribusi wilayah yang relatif lebih prospektif untuk pengembangan sistem panas bumi. Perbedaan fokus tersebut

menunjukkan bahwa data mikrotremor di Nagari Malampah masih dapat dikembangkan untuk memperoleh informasi lain yang berkaitan dengan eksplorasi panas bumi.

Berdasarkan penelitian terdahulu, metode HVSR telah digunakan pada lingkungan dengan karakteristik geologi yang berbeda, termasuk wilayah Sumatera Barat dan kawasan yang memiliki manifestasi panas bumi. Namun, informasi mengenai distribusi spasial parameter HVSR yang secara khusus digunakan untuk memperkirakan zona prospek panas bumi di Nagari Malampah masih terbatas. Penelitian Rahmania et al. (2026) memberikan informasi mengenai respons situs berdasarkan data mikrotremor, tetapi belum menghasilkan zonasi prospek panas bumi. Sementara itu, penelitian Marbun dan Pohan (2024) menunjukkan pemanfaatan HVSR pada lingkungan manifestasi panas bumi di Sumatera Barat, tetapi dilakukan pada lokasi yang berbeda dan dengan konteks manifestasi yang berbeda.

Kebaruan penelitian ini tidak terletak pada penggunaan metode HVSR maupun penggabungan parameter f_0 dan A_0 , karena kedua pendekatan tersebut telah digunakan dalam penelitian sebelumnya. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan data mikrotremor di Nagari Malampah untuk menyusun distribusi spasial zona prospek panas bumi berdasarkan kondisi geologi setempat yang secara eksplisit mengintegrasikan kelas f_0 dan A_0 . Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi awal yang lebih terarah mengenai wilayah yang relatif lebih prospektif untuk diprioritaskan dalam survei eksplorasi lanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dan memetakan distribusi zona prospek panas bumi di Nagari Malampah, Kecamatan Tigo Nagari, Kabupaten Pasaman, berdasarkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) yang diperoleh dari analisis data mikrotremor menggunakan metode HVSR. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi informasi awal dalam menentukan wilayah yang perlu diprioritaskan untuk validasi melalui survei geologi, geokimia, resistivitas, magnetotellurik (MT), atau metode eksplorasi lainnya.

2. KAJIAN TEORITIS

Geothermal

Panas bumi merupakan energi termal alami yang tersimpan di dalam kerak bumi, yang berasal dari sisa panas pembentukan bumi, peluruhan unsur-unsur radioaktif, serta aktivitas magmatik. Interaksi antara air tanah dan batuan bersuhu tinggi menghasilkan fluida hidrotermal yang berperan sebagai media penghantar energi panas dari kedalaman menuju permukaan (Sowizdzal, 2018). Apabila terakumulasi pada kondisi geologi yang sesuai, fluida tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan.

Sistem panas bumi secara umum tersusun atas tiga elemen utama, yaitu sumber panas (*heat source*) sebagai penyedia energi termal, batuan reservoir (*reservoir rock*) sebagai tempat penyimpanan dan sirkulasi fluida, serta lapisan penudung (*cap rock*) yang menghambat pelepasan fluida dan panas ke permukaan. Selain ketiga komponen tersebut, keberadaan struktur geologi berupa sesar dan rekahan memiliki peranan penting dalam mengontrol sirkulasi fluida panas dari kedalaman menuju permukaan (Faulds et al., 2018; Moeck, 2014). Interaksi antara sumber panas, batuan reservoir, lapisan penudung, dan struktur geologi mengontrol sirkulasi fluida hidrotermal yang pada akhirnya menentukan kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai komponen penyusun sistem panas bumi menjadi dasar dalam pelaksanaan eksplorasi untuk mengidentifikasi wilayah yang berpotensi memiliki sumber daya panas bumi.

Indonesia dikenal sebagai salah satu negara dengan cadangan panas bumi terbesar di dunia karena berada pada jalur *Ring of Fire*. Wilayah ini memiliki karakteristik aktivitas vulkanik dan tektonik yang tinggi sehingga menciptakan kondisi geologi yang sangat mendukung pembentukan sistem panas bumi (Hochstein & Sudarman, 2008). Kondisi tersebut menjadikan sejumlah besar wilayah di Indonesia berpotensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi. Energi panas bumi dapat dimanfaatkan baik secara langsung maupun melalui konversi menjadi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Nilai lebih dari potensi ini terletak pada sifatnya yang terbarukan, mampu menghasilkan pasokan energi yang berkelanjutan dan stabil, sekaligus menjadi opsi dalam menekan ketergantungan pada bahan bakar fosil (Darma et al., 2010; Grant & Bixley, 2011). Karena itu, tahapan eksplorasi awal menjadi penting untuk memperoleh perkiraan sebaran zona potensi panas bumi sebagai landasan pelaksanaan survei yang lebih mendetail.

Metode HVSr dan Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran tanah beramplitudo kecil yang berasal dari sumber alami maupun aktivitas manusia dan direkam menggunakan seismometer tiga komponen, yaitu dua komponen horizontal (N–S dan E–W) serta satu komponen vertikal (Z). *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) merupakan metode geofisika pasif yang membandingkan respons spektral komponen horizontal dan vertikal dari rekaman mikrotremor (Nakamura, 1989; SESAME, 2004). Metode ini dapat digunakan untuk memperoleh frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dari kurva HVSr.

Hasil analisis HVSr dipengaruhi oleh kondisi *ambient noise*, karakteristik kondisi bawah permukaan, serta parameter akuisisi dan pengolahan data (Molnar et al., 2022). Interpretasi hasil HVSr perlu mempertimbangkan kualitas data dan kondisi geologi daerah

penelitian. Kajian panas bumi menggunakan HVSr sebagai metode pendukung untuk memperoleh informasi awal mengenai variasi respons situs dan kondisi bawah permukaan. HVSr tidak dapat mendeteksi fluida hidrotermal secara langsung, sehingga interpretasi prospek panas bumi perlu didukung oleh informasi geologi, geokimia, resistivitas, magnetotellurik (MT), atau metode geofisika lainnya.

Frekuensi Dominan (f_0) dan Faktor Amplifikasi (A_0)

Frekuensi dominan (f_0) merupakan frekuensi pada puncak utama kurva HVSr yang berkaitan dengan respons resonansi lapisan bawah permukaan. Nilai f_0 dipengaruhi oleh ketebalan lapisan, sifat material, serta kontras kecepatan gelombang geser antar lapisan. Nilai yang rendah umumnya menunjukkan lapisan bawah permukaan yang relatif lebih tebal atau lebih lunak, sedangkan nilai yang tinggi dapat berkaitan dengan lapisan yang relatif lebih tipis atau lebih kaku. Interpretasi tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menentukan jenis batuan maupun keberadaan reservoir panas bumi.

Klasifikasi frekuensi dominan digunakan dalam penelitian ini sebagai salah satu dasar untuk menginterpretasikan variasi kondisi bawah permukaan.

Tabel 1. Klasifikasi Jenis Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Dominan (Kanai, 1983).

Tipe	Frekuensi Dominan (Hz)	Deskripsi
Tipe IV (Jenis I)	6,667 – 20	Batuan keras tersier atau lebih tua; sedimen sangat tipis
Tipe III (Jenis II)	4 – 6,667	Batuan alluvial; ketebalan sedimen 5–10 m
Tipe II (Jenis III)	2,5 – 4	Batuan alluvial tebal; ketebalan sedimen 10–30 m
Tipe I (Jenis IV)	< 2,5	Sedimen sangat tebal (≥ 30 m); lumpur, delta, <i>top soil</i>

Faktor amplifikasi (A_0) merupakan amplitudo puncak pada kurva HVSr yang menunjukkan tingkat penguatan respons spektral pada frekuensi dominan. Nilai A_0 digunakan dalam penelitian ini sebagai parameter pendukung untuk mengetahui variasi respons amplifikasi antar titik pengukuran. Nilai A_0 yang tinggi menunjukkan respons amplifikasi yang relatif kuat. (SESAME, 2004; Molnar et al., 2022).

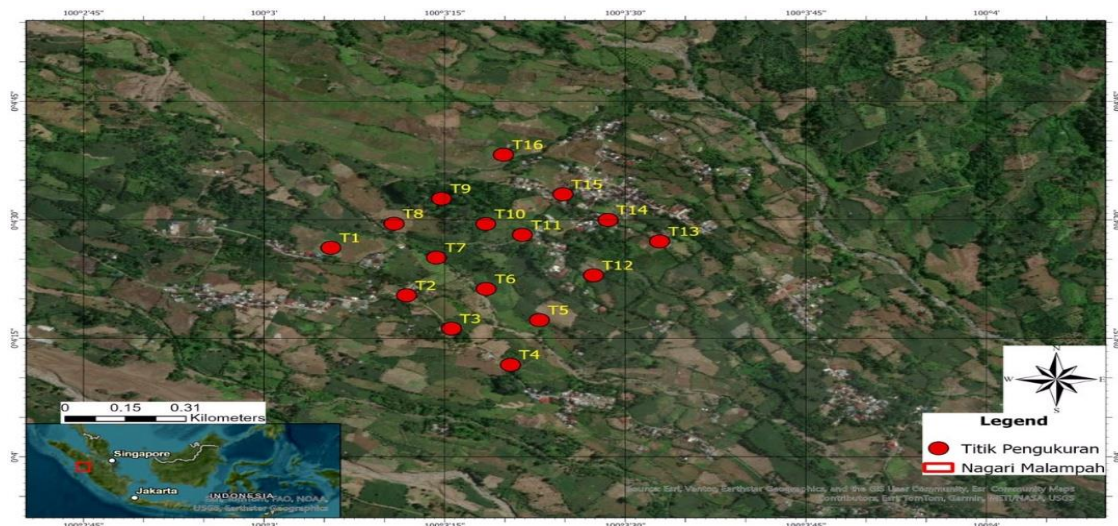
Tabel 1. Klasifikasi Nilai Faktor Amplifikasi.

Zona	Klasifikasi	Nilai A_0
1	Rendah	$A_0 < 3$
2	Sedang	$3 \leq A_0 < 6$
3	Tinggi	$6 \leq A_0 < 9$
4	Sangat Tinggi	$A_0 \geq 9$

Integrasi f_0 dan A_0 dilakukan melalui skoring empat tingkat. Nilai f_0 yang lebih rendah memperoleh skor lebih tinggi karena menunjukkan respons resonansi yang berkaitan dengan lapisan relatif tebal atau lunak, sedangkan nilai A_0 yang lebih tinggi memperoleh skor lebih tinggi karena menunjukkan kontras impedansi yang lebih kuat. Total skor 2–3 dikategorikan sebagai zona potensi rendah, skor 4–5 sebagai zona potensi sedang, dan skor 6–8 sebagai zona potensi tinggi.

3. METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksploratif untuk mengestimasi distribusi zona prospek panas bumi di Nagari Malampah. Data yang dianalisis berupa rekaman mikrotremor pada 16 titik pengukuran. Titik pengukuran disebarakan pada area yang mewakili variasi kondisi geologi dan manifestasi panas bumi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi sebaran titik pengukuran mikrotremor di Nagari Malampah.

Data mikrotremor direkam menggunakan Sysmatrack-M.AE dengan seismometer tiga komponen tipe **S3S** yang terdiri atas komponen Utara–Selatan (N–S), Timur–Barat (E–W), dan vertikal (Z). Perekaman dilakukan selama 25–45 menit pada setiap titik. Arah sensor ditentukan menggunakan kompas, sedangkan posisi titik pengukuran ditentukan menggunakan GPS.

Pengolahan data dilakukan menggunakan EasyHVSR. Rekaman mikrotremor terlebih dahulu diseleksi untuk memperoleh sinyal yang relatif stabil dan mengurangi pengaruh gangguan. Data kemudian dibagi menjadi *window* dengan panjang 20–30 detik dan diberikan *taper* Hanning untuk mengurangi *spectral leakage*. Setiap *window* ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Spektrum

yang diperoleh kemudian dihaluskan menggunakan metode Konno–Ohmachi. Pengolahan dilakukan terhadap 32 *window* pada setiap titik pengukuran.

Komponen horizontal N–S dan E–W digabungkan menggunakan metode rata-rata kuadrat untuk memperoleh spektrum horizontal gabungan. Spektrum horizontal tersebut dibandingkan dengan komponen vertikal (Z) untuk menghasilkan kurva HVSR. Frekuensi dominan (f_0) ditentukan dari puncak utama kurva HVSR, sedangkan faktor amplifikasi (A_0) diperoleh dari amplitudo puncak pada frekuensi dominan.

Kontrol kualitas data dilakukan dengan mengacu pada kriteria SESAME (2004). Pemeriksaan dilakukan terhadap kestabilan kurva HVSR dan kejelasan puncak (*clear peak*). *Window* yang menunjukkan gangguan atau ketidakstabilan tidak digunakan dalam penentuan parameter HVSR. Kurva yang memenuhi kriteria kualitas digunakan untuk memperoleh nilai dan pada setiap titik pengukuran dikelompokkan berdasarkan klasifikasi yang telah ditetapkan. Setiap parameter diberikan skor sesuai kelasnya, kemudian skor dan dijumlahkan untuk memperoleh skor integrasi. Skor integrasi digunakan untuk menentukan zona prospek relatif rendah, sedang, dan tinggi

Hasil pemetaan digunakan sebagai indikasi kondisi yang relatif lebih prospektif untuk zona panas bumi, bukan sebagai bukti langsung keberadaan fluida hidrotermal, reservoir, rekahan, atau alterasi hidrotermal. Validasi hasil memerlukan dukungan data geologi, geokimia, resistivitas, magnetotellurik (MT), atau metode eksplorasi lainnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang diperoleh dari hasil analisis data mikrotremor pada tiap titik pengamatan disajikan pada Tabel

Tabel 2. Hasil Analisis Data Mikrotremor.

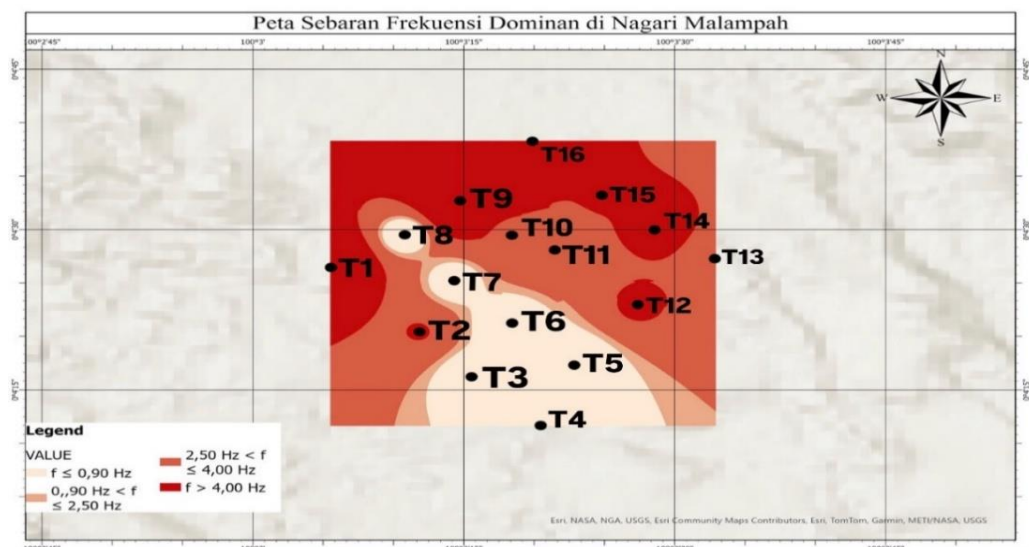
Titik Ke-	Lat	Long	Frekuensi Dominan (f_0) (Hz)	Faktor Amplifikasi (A_0)
1	0.050	100.049	7.42	2.42
2	0.070	100.050	3.44	2.08
3	0,071	100.054	3.61	3.69
4	0.070	100.055	3.61	3.10
5	0.072	100.056	0.50	9.28
6	0.073	100.055	0.65	5.07
7	0.074	100.054	3.47	2.27
8	0.075	100.053	0.65	3.17
9	0.076	100.053	8.20	2.46
10	0.075	100.055	2.75	13.11

11	0.074	100.056	2.90	2.71
12	0.072	100.057	3.65	2.80
13	0.070	100.060	3.02	5.06
14	0.074	100.058	3.65	3.02
15	0.076	100.056	3.35	2.77
16	0.077	100.055	3.35	4.49

Pembahasan

Interpretasi Frekuensi Dominan

Sebaran hasil analisis *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) yang didapat dari interpolasi nilai f_0 pada keseluruhan titik pengamatan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta distribusi frekuensi dominan (f_0) di Nagari Malampah.

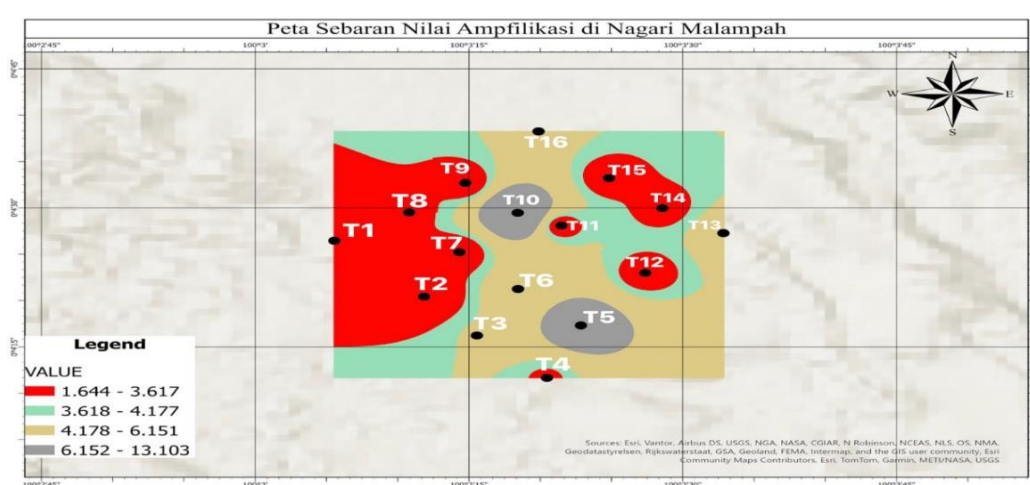
Nilai frekuensi dominan (f_0) di daerah penelitian terbagi menjadi empat kelas, yaitu sangat rendah ($f_0 \leq 0,90$ Hz), rendah ($0,90 < f_0 \leq 2,50$ Hz), sedang ($2,50 < f_0 \leq 4,00$ Hz), dan tinggi ($f_0 > 4,00$ Hz). Zona dengan nilai frekuensi dominan sangat rendah teridentifikasi pada titik T5, T6, dan T8, sedangkan nilai tinggi dijumpai pada titik T1 dan T9. Sebaran tersebut menunjukkan adanya variasi kondisi geologi di wilayah kajian.

Frekuensi dominan merupakan parameter utama dalam analisis HVSr yang digunakan untuk menginterpretasikan variasi kondisi geologi berdasarkan respons mikrotremor (Nakamura, 1989; SESAME, 2004). Variasi nilai frekuensi dominan di Nagari Malampah menunjukkan bahwa kondisi geologi bawah permukaan tidak homogen. Kondisi ini dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik Gunung Talamau dan struktur Sesar Sumatra yang menyebabkan perbedaan litologi, tingkat pelapukan batuan, serta perkembangan rekahan pada setiap lokasi pengamatan.

Zona dengan nilai frekuensi dominan relatif rendah diinterpretasikan memiliki keberadaan sistem panas bumi, terutama apabila dianalisis bersama parameter faktor amplifikasi (A_0). Interpretasi tersebut sejalan dengan Nakamura (1989), SESAME (2004), Molnar (2022), dan Pratomo (2023), yang menjelaskan bahwa frekuensi dominan efektif digunakan untuk mengidentifikasi variasi kondisi geologi. Oleh karena itu, frekuensi dominan tidak digunakan sebagai parameter tunggal, tetapi diintegrasikan dengan faktor amplifikasi (A_0) untuk mengestimasi distribusi zona potensi panas bumi.

Interpretasi Faktor Amplifikasi

Sebaran spasial nilai faktor amplifikasi (A_0) dari seluruh titik pengamatan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta distribusi faktor amplifikasi (A_0) di Nagari Malampah.

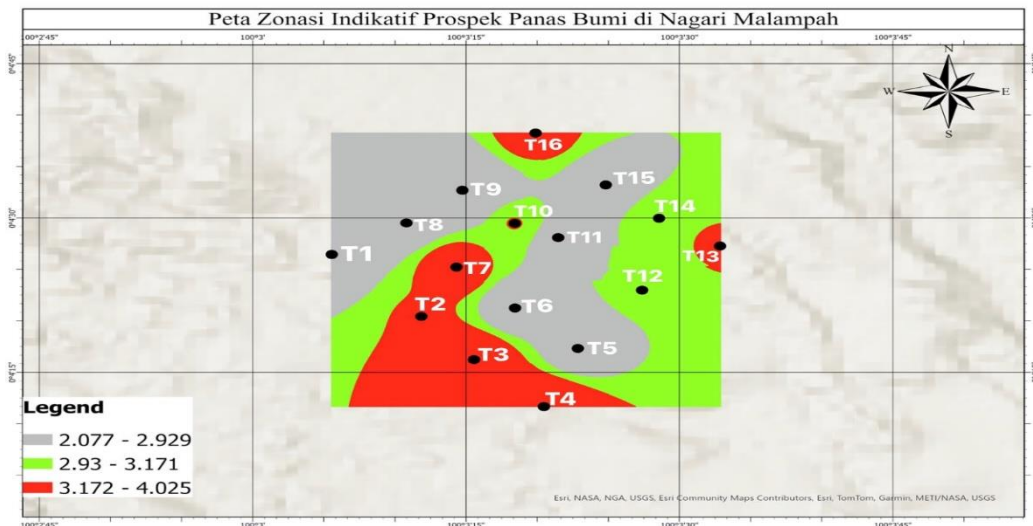
Nilai faktor amplifikasi (A_0) di daerah penelitian berkisar antara 2,08–13,11 dan menunjukkan variasi spasial yang cukup signifikan. Pada metode HVSR, faktor amplifikasi digunakan untuk menginterpretasikan kontras impedansi antarlapisan batuan berdasarkan respons gelombang mikrotremor (Nakamura, 1989; SESAME, 2004). Variasi nilai A_0 di Nagari Malampah dipengaruhi oleh kondisi geologi kawasan vulkanik yang dikontrol oleh aktivitas Gunung Talamau dan struktur Sesar Sumatra. Aktivitas tektonik, perkembangan rekahan, serta kemungkinan alterasi hidrotermal menyebabkan perubahan sifat fisik batuan yang menghasilkan variasi nilai faktor amplifikasi.

Pada kajian ini, faktor amplifikasi tidak diinterpretasikan sebagai bukti langsung keberadaan sistem panas bumi, tetapi digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengidentifikasi wilayah yang lebih mendukung perkembangan sistem panas bumi. Zona dengan nilai A_0 relatif tinggi diinterpretasikan memiliki kontras impedansi yang lebih besar sehingga menjadi indikator awal dalam mengestimasi distribusi zona potensi panas bumi, terutama jika dikombinasikan dengan parameter frekuensi dominan (f_0).

Interpretasi tersebut sejalan dengan Fahmi (2021), Molnar (2022), dan Pratomo (2023), yang menjelaskan bahwa faktor amplifikasi dimanfaatkan untuk mengidentifikasi variasi kondisi geologi dan memberikan hasil yang lebih andal apabila diintegrasikan dengan parameter HVSR lainnya. Oleh karena itu, pada kajian ini nilai A_0 tidak digunakan secara terpisah, melainkan diintegrasikan dengan frekuensi dominan (f_0) untuk menghasilkan estimasi distribusi zona potensi panas bumi di Nagari Malampah.

Estimasi Distribusi Zona Potensi Panas Bumi

Penggabungan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) menghasilkan peta estimasi sebaran zona potensi panas bumi yang menggambarkan keragaman spasial potensi panas bumi di Nagari Malampah. Melalui integrasi kedua parameter tersebut, wilayah kajian dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yakni zona potensi rendah, zona potensi sedang, dan zona potensi tinggi, seperti ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta estimasi distribusi zona potensi panas bumi di Nagari Malampah.

Zona potensi rendah ditunjukkan oleh kombinasi f_0 yang tinggi dan A_0 yang rendah. Kombinasi tersebut diinterpretasikan sebagai wilayah dengan kondisi geologi yang kurang mendukung perkembangan sistem panas bumi dibandingkan wilayah lainnya. Berdasarkan hasil interpretasi, zona ini umumnya berkembang pada bagian tengah hingga barat laut daerah kajian.

Zona dengan potensi sedang dicirikan oleh perpaduan nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi pada rentang menengah, sehingga dimaknai sebagai kawasan peralihan antara zona berpotensi rendah dan tinggi. Perpaduan kedua parameter tersebut mengindikasikan kondisi geologi yang lebih kondusif bagi perkembangan sistem panas bumi, kendati sifat interpretasinya masih tidak langsung sehingga tetap memerlukan verifikasi lanjutan melalui metode eksplorasi lain.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kajian ini berhasil memperkirakan sebaran zona potensi panas bumi di Nagari Malampah melalui analisis *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) yang menggabungkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dari data mikrotremor. Hasil kajian memperlihatkan bahwa penggabungan kedua parameter tersebut mampu mengenali zona potensi panas bumi yang terbagi menjadi kategori rendah, sedang, dan tinggi, dengan zona potensi tinggi ditandai oleh nilai frekuensi dominan rendah dan faktor amplifikasi tinggi, sehingga ditafsirkan mengandung fluida hidrotermal. Temuan ini mengonfirmasi bahwa metode HVSr merupakan pendekatan eksplorasi awal yang efektif, cepat, non-invasif, dan relatif murah untuk mengenali zona prospek panas bumi pada kawasan vulkanik yang dipengaruhi struktur sesar aktif.

DAFTAR REFERENSI

- Badan Geologi. (2022). *Peta potensi panas bumi Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Darma, S., Harsoprayitno, S., Setiawan, B., Hadyanto, Sukhyar, R., Wahyuningsih, A. E., Ganefianto, N., & Stimac, J. (2010). Geothermal energy update in Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia.
- Fahmi, A. (2021). Identifikasi zona panas bumi menggunakan metode mikrotremor HVSr. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 7(2), 112–125.
- Faulds, J. E., Hinz, N. H., Coolbaugh, M. F., Cashman, P. H., Kratt, C., Dering, G., Edwards, J., Mayhew, B., & McLachlan, H. (2018). Assessment of favorable structural settings of geothermal systems in the Great Basin. *Geothermal Resources Council Transactions*, 35, 777–784.
- Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). *Geothermal reservoir engineering* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383880-3.10001-0>
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2008. *Geothermics*, 37(3), 220–266. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.01.001>
- Kanai, K. (1966). Improved empirical formula for the characteristics of strong earthquake motions. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 133, 1–15.
- Kasbani. (2008). Tipe sistem panas bumi di Indonesia dan estimasi potensinya. *Bulletin of Scientific Contribution*, 6(2), 89–95.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>

- Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P. Y., Castellaro, S., Cornou, C., Cox, B., Guillier, B., Hassani, B., Kawase, H., Matsushima, S., McGann, C., Morris, C., Stanko, D., & Yong, A. (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method. *Journal of Seismology*, 26(4), 653–685. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9>
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25–33.
- Nurhayati, Baharuddin, & Umar, E. P. (2021). Aplikasi metode HVSR mikrotremor untuk eksplorasi panas bumi. *Jurnal Gecelebes*, 5(1), 45–53. <https://doi.org/10.23960/jge.v5i1.22>
- Pratomo, R. A., Sunardi, B., & Haryanto, I. (2023). Interpretasi zona prospek panas bumi berbasis parameter HVSR mikrotremor. *Jurnal Geofisika*, 21(1), 1–12.
- Rock, N. M. S., Aldiss, D. T., Aspden, J. A., Clarke, M. C. G., Djunuddin, A., Kartawa, W., Miswar, S., Thompson, S. J., & Whandoyo, R. (1983). *Peta geologi lembar Lubuk Sikaping, Sumatra*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation* (SESAME European Research Project WP12, Deliverable D23.12). European Commission.
- Sowizdzal, A. (2018). Geothermal energy resources in Poland-Overview of the current state of knowledge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4020–4027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.070>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- Wijaya, A. S., & Hidayat, R. (2021). Karakterisasi bawah permukaan menggunakan metode HVSR untuk identifikasi zona panas bumi. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 17(2), 55–63.