



Indeks Kerentanan Seismik di Kecamatan Pantai Cermin Menggunakan Data Mikrotremor

Agustia^{1*}, Akmam²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: agustia09@email.com¹

Article Info :

Received:
23-11-2025
Revised:
22-12-2025
Accepted:
31-12-2025

Abstract

This study assesses seismic vulnerability in Pantai Cermin District, West Sumatra, using microtremor measurements analyzed through the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method. Ambient vibration data were systematically acquired to characterize local site effects by deriving dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0), which reflect the dynamic behavior of near-surface soil layers. These parameters were integrated to compute the seismic vulnerability index (K_g) as an indicator of potential soil deformation under seismic loading. The results reveal pronounced spatial variability in f_0 , A_0 , and K_g values, strongly controlled by geological conditions. Areas dominated by young alluvial deposits and unconsolidated sediments exhibit low dominant frequencies, high amplification, and elevated K_g values, indicating high susceptibility to seismic ground motion amplification. Conversely, zones underlain by compact volcanic and intrusive rocks show more stable seismic responses. The spatial correspondence between high K_g zones and densely populated areas highlights increased seismic risk due to the interaction between site effects and exposure. The consistency between HVSr characteristics, geological framework, and vulnerability patterns demonstrates the robustness of the microtremor-based approach for seismic microzonation. This study provides a scientific basis for risk-informed land-use planning and earthquake mitigation strategies in seismically active regions.

Keywords: Seismic Vulnerability Index, HVSr, Microtremor, Site Effect, Microzonation.

Abstrak

Studi ini mengevaluasi kerentanan gempa di Kabupaten Pantai Cermin, Sumatera Barat, menggunakan pengukuran getaran mikro yang dianalisis melalui metode Rasio Spektral Horizontal ke Vertikal (HVSr). Data getaran lingkungan diperoleh secara sistematis untuk menggambarkan efek lokasi lokal dengan menentukan frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0), yang mencerminkan perilaku dinamis lapisan tanah permukaan. Parameter-parameter ini diintegrasikan untuk menghitung indeks kerentanan gempa (K_g) sebagai indikator potensi deformasi tanah akibat beban gempa. Hasil penelitian menunjukkan variasi spasial yang signifikan pada nilai f_0 , A_0 , dan K_g , yang sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi. Wilayah yang didominasi oleh endapan aluvial muda dan sedimen yang belum terkonsolidasi menunjukkan frekuensi dominan rendah, amplifikasi tinggi, dan nilai K_g yang tinggi, menunjukkan kerentanan tinggi terhadap amplifikasi gerakan tanah seismik. Sebaliknya, zona yang didasari oleh batuan vulkanik dan intrusif yang padat menunjukkan respons seismik yang lebih stabil. Korelasi spasial antara zona dengan nilai HVSr tinggi dan kawasan padat penduduk menyoroti peningkatan risiko gempa akibat interaksi antara efek situs dan paparan. Konsistensi antara karakteristik HVSr, kerangka geologi, dan pola kerentanan menunjukkan keandalan pendekatan berbasis mikrotremor dalam pemetaan mikrozonasi gempa. Studi ini memberikan landasan ilmiah untuk perencanaan penggunaan lahan yang berorientasi risiko dan strategi mitigasi gempa di wilayah seismik aktif.

Kata kunci: Indeks Kerentanan Gempa, HVSr, Mikrogetaran, Efek Situs, Mikrozonasi.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan mutakhir kajian kebencanaan seismik pada dekade terakhir menunjukkan pergeseran paradigma dari pendekatan deterministik berbasis kejadian gempa besar menuju pendekatan probabilistik dan berbasis kondisi tapak lokal, seiring meningkatnya kesadaran global bahwa kerusakan akibat gempa lebih banyak ditentukan oleh karakteristik geologi dangkal dibandingkan magnitudo semata. Dalam konteks ini, metode mikrotremor dengan pendekatan Horizontal to Vertical Spectral

Ratio (HVSr) berkembang pesat sebagai instrumen non-destruktif, efisien, dan berbiaya relatif rendah untuk memetakan respons dinamik tanah, khususnya dalam penentuan frekuensi dominan dan indeks kerentanan seismik. Penerapan metode ini menjadi semakin relevan di wilayah pesisir dan daerah dengan sedimentasi Kuartar yang tebal, yang secara inheren memperkuat gelombang seismik dan meningkatkan potensi kerusakan infrastruktur. Secara regional, Indonesia menempati posisi strategis sekaligus rentan dalam lanskap tektonik global karena berada pada pertemuan lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, sebagaimana tercermin dalam catatan historis gempa signifikan dan merusak yang berulang sejak abad ke-19 hingga kini (BMKG, 2026), serta frekuensi kejadian gempa menengah yang berdampak langsung pada wilayah Sumatera Barat dan sekitarnya (BNPB, 2021).

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa analisis kerentanan seismik berbasis mikrotremor mampu mengungkap heterogenitas respons tanah yang tidak terdeteksi oleh peta bahaya seismik regional. Studi di wilayah pesisir Teluk Palu Barat mengonfirmasi bahwa nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi berkorelasi kuat dengan zona kerusakan pascagempa dan amplifikasi gelombang pada sedimen lepas (Amirudin et al., 2023; Madrinovella, 2023). Temuan serupa dilaporkan di Aceh Besar, di mana pemetaan HVSr berhasil membedakan zona dengan potensi amplifikasi tinggi meskipun berada dalam satuan geologi yang tampak homogen pada skala regional (Asnawi et al., 2023). Penelitian di Bengkulu Selatan dan Sleman memperluas cakupan analisis dengan mengaitkan indeks kerentanan seismik dengan deformasi geser tanah dan fenomena longsor terinduksi gempa, menegaskan bahwa mikrotremor tidak hanya relevan untuk evaluasi bahaya gempa struktural, tetapi juga untuk bahaya turunan geodinamik (Awaliyah et al., 2023; Maryani, 2024). Pada level internasional, pengembangan metodologi baru yang mengintegrasikan data mikrotremor dengan skala intensitas seismik lokal di Taiwan memperkuat posisi pendekatan ini sebagai alat evaluasi kerentanan tapak yang adaptif lintas konteks tektonik (Liu & Wu, 2025).

Meskipun literatur menunjukkan kemajuan metodologis yang signifikan, sejumlah keterbatasan konseptual dan empiris masih mengemuka secara konsisten. Sebagian besar penelitian cenderung memusatkan analisis pada kawasan perkotaan besar atau wilayah pascagempa besar, sehingga daerah pesisir semi-rural dengan dinamika sedimentasi kompleks relatif terabaikan. Integrasi antara hasil mikrotremor dengan konteks geomorfologi, litologi, dan kejadian bencana aktual sering kali bersifat implisit dan belum diuji secara kritis terhadap data kebencanaan lokal yang terdokumentasi. Selain itu, meskipun pendekatan indeks kerentanan seismik telah diaplikasikan secara luas, perbedaan dalam formulasi indeks dan interpretasi nilai ambang masih memunculkan inkonsistensi antarstudi, khususnya ketika diaplikasikan pada wilayah dengan kombinasi bahaya gempa dan longsor (Hasan et al., 2024; Liu et al., 2023). Keterbatasan ini menunjukkan adanya celah pengetahuan terkait bagaimana respons mikrotremor mencerminkan kondisi kerentanan aktual pada wilayah pesisir yang secara simultan dipengaruhi oleh proses tektonik dan geodinamik dangkal.

Urgensi ilmiah dan praktis dari permasalahan ini menjadi semakin nyata ketika dikaitkan dengan kondisi empiris wilayah Pantai Cermin, Kabupaten Solok, yang secara statistik menunjukkan paparan bencana alam yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Data resmi mencatat bahwa sejumlah desa di wilayah ini mengalami kejadian bencana berulang, termasuk gempa bumi dan longsor, dengan intensitas yang berdampak langsung pada permukiman dan infrastruktur dasar (BPS Kabupaten Solok, 2024; BPS, 2024). Kejadian longsor di wilayah sekitar memperlihatkan keterkaitan erat antara kondisi tanah, topografi, dan getaran seismik, yang belum sepenuhnya terkuantifikasi dalam kerangka evaluasi kerentanan tapak (BPBD, 2024). Pada saat yang sama, keberadaan satuan geologi hasil pemetaan regional menunjukkan dominasi endapan sedimen yang berpotensi memperkuat gelombang seismik, menempatkan Pantai Cermin sebagai laboratorium alam yang krusial untuk pengujian pendekatan mikrotremor dalam konteks multi-bahaya (Gafoer et al., 1992).

Dalam lanskap keilmuan tersebut, penelitian ini memosisikan diri sebagai upaya sintesis antara pendekatan geofisika mikrotremor dan konteks kebencanaan lokal yang terdokumentasi secara institusional. Berbeda dari studi-studi sebelumnya yang berfokus pada validasi metode di wilayah pascagempa besar, riset ini diarahkan untuk mengevaluasi kerentanan seismik pada wilayah dengan riwayat gempa menengah namun berulang, di mana akumulasi dampak jangka panjang terhadap lingkungan binaan sering kali luput dari perhatian. Dengan mengaitkan indeks kerentanan seismik hasil HVSr dengan karakteristik geologi dan statistik bencana lokal, penelitian ini berupaya menjembatani kesenjangan antara analisis tapak berskala mikro dan kebutuhan perencanaan mitigasi berbasis wilayah administratif.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memetakan indeks kerentanan seismik di Kecamatan Pantai Cermin menggunakan data mikrotremor sebagai dasar evaluasi respons dinamik tanah, sekaligus mengkaji implikasinya terhadap potensi dampak gempa di wilayah pesisir yang berkembang. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada penguatan kerangka interpretasi indeks kerentanan seismik dalam konteks wilayah pesisir dengan kombinasi bahaya gempa dan longsor, sementara kontribusi metodologisnya mencakup penerapan dan adaptasi analisis HVSR pada skala kecamatan yang terintegrasi dengan data spasial lokal. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan menyediakan dasar ilmiah yang lebih presisi bagi perencanaan tata ruang, mitigasi bencana, dan pengambilan keputusan berbasis risiko di wilayah Pantai Cermin.

METODE PENELITIAN

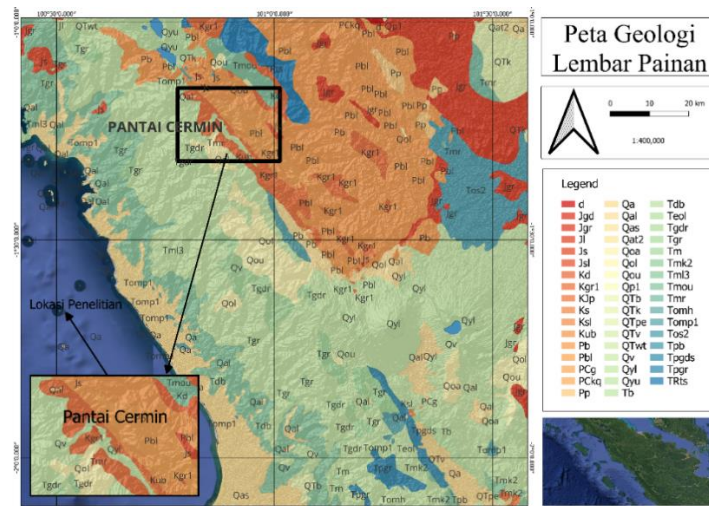
Penelitian ini merupakan studi empiris kuantitatif yang dirancang untuk mengukur dan menganalisis tingkat kerentanan seismik tanah permukaan melalui pengukuran mikrotremor menggunakan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). Proses pengembangan penelitian dimulai dengan perancangan skema akuisisi data lapangan berbasis representativitas geologi dan penggunaan lahan di Kecamatan Pantai Cermin, Kabupaten Solok, yang berada pada jalur aktif Sesar Sumatera (Segmen Suliti) dan tersusun oleh satuan batuan vulkanik Kuartar, batugamping, granodiorit, serta endapan aluvial muda. Pengukuran mikrotremor dilakukan pada titik-titik yang ditentukan secara sistematis menggunakan seismometer tiga komponen tipe S3S yang terhubung dengan perekam Sysmatrack-M.AE, dengan orientasi sensor dikontrol menggunakan kompas dan posisi geografis ditentukan melalui GPS. Getaran alami tanah direkam dalam durasi yang memadai untuk menjamin kestabilan spektrum frekuensi, kemudian diolah menggunakan perangkat lunak EasyHVSR melalui tahapan pra-pengolahan sinyal, segmentasi window, transformasi Fourier cepat, perhitungan rasio spektral HVSR, serta penghalusan spektrum Konno–Ohmachi. Parameter utama yang diekstraksi meliputi frekuensi dominan tanah (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0), yang selanjutnya dikombinasikan secara matematis untuk memperoleh indeks kerentanan seismik (K_g) sebagai indikator kuantitatif respons dinamik tanah terhadap guncangan gempa.

Ketahanan metodologis penelitian ini dijamin melalui penerapan prosedur validasi internal dan evaluasi berbasis konsistensi fisik parameter seismik. Validasi dilakukan dengan menguji kestabilan kurva HVSR antar-window dan antar-titik pengukuran untuk memastikan bahwa puncak frekuensi dominan yang teridentifikasi bersifat robust dan bukan artefak noise temporer. Metrik evaluasi utama mencakup kejelasan puncak spektrum, rasio signal-to-noise, serta keseragaman nilai f_0 dan A_0 pada zona geologi yang serupa, yang digunakan sebagai dasar penilaian reliabilitas hasil. Nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dievaluasi secara komparatif untuk mengidentifikasi variasi spasial kerentanan tanah dan keterkaitannya dengan kondisi geologi lokal, sehingga memungkinkan interpretasi yang terukur dan dapat direproduksi. Keunikan metodologi ini terletak pada integrasi pengukuran mikrotremor beresolusi lokal dengan analisis indeks kerentanan seismik pada skala kecamatan, yang memperkuat kapasitas metode HVSR sebagai alat mikrozonasi seismik berbasis bukti empiris dan relevan bagi mitigasi risiko di wilayah pesisir berkembang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

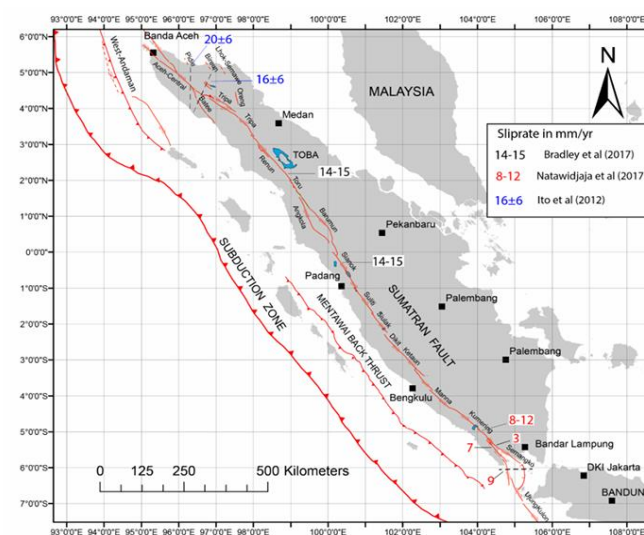
Konteks Geologi, Seismotektonik, dan Paparan Kebencanaan Wilayah Pantai Cermin

Wilayah Kecamatan Pantai Cermin berada dalam konteks seismotektonik yang kompleks karena keterkaitannya langsung dengan sistem Sesar Besar Sumatra yang aktif secara regional dan berperan sebagai sumber utama gempa bumi dangkal di Sumatra Barat. Aktivitas Segmen Suliti yang melintas wilayah ini merefleksikan mekanisme sesar geser mendatar yang secara historis menghasilkan gempa bermagnitudo menengah hingga kuat dengan dampak kerusakan signifikan pada skala lokal hingga regional (BMKG, 2026). Rekaman kejadian gempa merusak tahun 2007 dan 2018 memperlihatkan bahwa intensitas guncangan tidak hanya ditentukan oleh magnitudo, tetapi juga oleh kondisi geologi lokal dan kedekatan terhadap sumber gempa (BNPB, 2021). Pola kerusakan yang meluas pada gempa bermagnitudo menengah memperkuat argumen bahwa efek tapak lokal memainkan peran dominan dalam amplifikasi guncangan seismik (Amirudin et al., 2023; Madrinovella, 2023). Kondisi ini menempatkan Pantai Cermin sebagai wilayah strategis untuk analisis kerentanan seismik berbasis karakteristik tanah permukaan.



Gambar 1. Wilayah Kecamatan Pantai Cermin (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi)

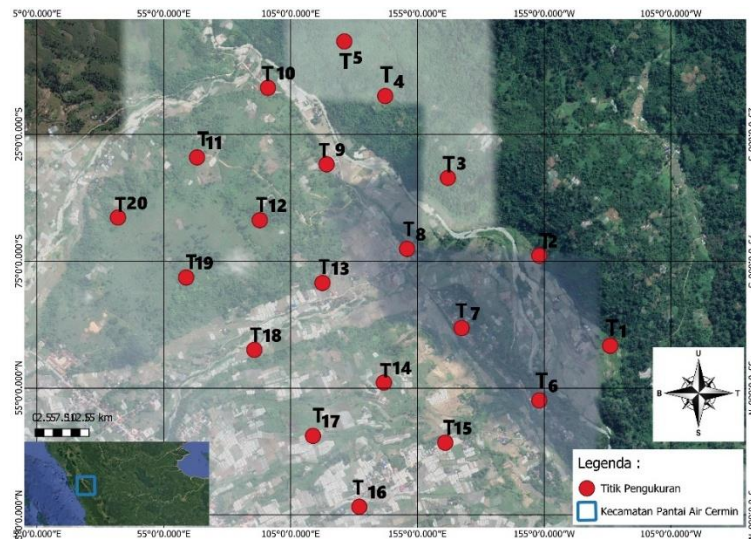
Secara spasial, posisi Kecamatan Pantai Cermin dalam kerangka regional Sumatra Barat dapat dipahami melalui representasi wilayah administratif dan fisiografi yang ditunjukkan pada Gambar 1 yang memperlihatkan keterkaitan antara morfologi, satuan geologi, dan zona permukiman. Distribusi wilayah nagari yang luas dengan pola permukiman menyebar menciptakan tingkat eksposur yang tinggi terhadap bahaya gempa bumi, terutama pada area yang berkembang di atas sedimen aluvial muda (BPS Kabupaten Solok, 2024). Kondisi ini selaras dengan temuan mikrozonasi di wilayah pesisir dan dataran aluvial lain di Indonesia yang menunjukkan peningkatan kerusakan struktural pada zona dengan sedimen lunak tebal (Asnawi et al., 2023; Widyawarman et al., 2024). Keberadaan fasilitas vital pada zona tersebut memperbesar potensi kerugian sosial-ekonomi ketika terjadi guncangan seismik. Kerangka spasial ini menjadi dasar penting dalam menafsirkan hasil analisis mikrotremor pada tahap selanjutnya.



Gambar 2. Peta patahan aktif Zona Patahan Sumatera (SFZ)

Sistem patahan aktif regional yang mengontrol dinamika seismik wilayah ditunjukkan secara lebih rinci pada Gambar 2 yang memperlihatkan jaringan segmen sesar aktif dari utara hingga selatan Pulau Sumatra. Segmen Suliti dan Segmen Sumani yang berada di sekitar wilayah penelitian dikenal memiliki laju pergeseran yang relatif tinggi dan sering memicu gempa dangkal dengan mekanisme geser mendatar (BMKG, 2026). Karakteristik ini konsisten dengan studi evaluasi kerentanan seismik di wilayah tektonik aktif lain yang menunjukkan hubungan erat antara kedekatan terhadap segmen sesar dan peningkatan nilai indeks kerentanan seismik (Priadi et al., 2024; Sani, 2025). Pola sebaran patahan

aktif tersebut juga berimplikasi pada heterogenitas medan tegangan dan variasi respons tanah lokal. Informasi ini menjadi kerangka interpretatif utama dalam mengaitkan hasil HVSR dengan sumber gempa regional.



Gambar 3. Lokasi Penelitian Kecamatan Pantai Cermin

Lokasi titik-titik pengukuran mikrotremor yang dirancang secara sistematis ditunjukkan pada Gambar 3, yang menggambarkan upaya representasi kondisi geologi dan penggunaan lahan secara proporsional. Penyebaran titik pengamatan pada zona permukiman, lahan terbuka, dan area dengan variasi litologi memungkinkan analisis komparatif respons dinamik tanah secara kuantitatif. Strategi ini sejalan dengan pendekatan empiris pada studi mikrozonasi seismik berbasis HVSR yang menekankan pentingnya kepadatan dan keterwakilan titik pengukuran untuk meningkatkan reliabilitas interpretasi (Rudin & Safani, 2024; Nurwidiyanto et al., 2023). Penempatan titik yang mencakup zona sedimen lunak dan batuan lebih kompak memungkinkan identifikasi kontras impedansi seismik secara lebih jelas. Kerangka akuisisi ini memperkuat ketahanan metodologis penelitian dalam merepresentasikan kondisi tapak lokal.

Karakteristik litologi wilayah Pantai Cermin mencerminkan sejarah geologi yang panjang dan kompleks, meliputi satuan batuan beku, sedimen, dan metamorf sebagaimana dipetakan pada Peta Geologi Lembar Painan (Gafoer et al., 1992). Keberadaan endapan aluvial Kuartar yang bersifat lepas dan tidak terkonsolidasi memiliki implikasi langsung terhadap peningkatan amplifikasi gelombang seismik, sebagaimana ditunjukkan dalam berbagai studi mikrotremor pada wilayah aluvial aktif (Maryani, 2024; Yatini et al., 2023). Satuan vulkanik terlapuk dan batugamping terfraktur juga berpotensi menghasilkan respons seismik yang kompleks akibat variasi kekakuan lapisan bawah permukaan. Heterogenitas litologi ini menjadi faktor kunci dalam menjelaskan variasi nilai frekuensi dominan dan amplifikasi yang diperoleh dari analisis HVSR. Interpretasi hasil penelitian ini tidak dapat dilepaskan dari konteks litologi regional tersebut.

Dimensi kerentanan wilayah tidak hanya ditentukan oleh faktor geologi, tetapi juga oleh karakteristik demografis dan distribusi penduduk yang meningkatkan tingkat paparan terhadap bahaya seismik. Data kependudukan Kecamatan Pantai Cermin menunjukkan jumlah penduduk yang signifikan dengan distribusi spasial yang terkonsentrasi pada zona-zona tertentu, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1 yang disajikan untuk memperkuat analisis kontekstual.

Tabel 1. Karakteristik Kependudukan dan Paparan Bencana Kecamatan Pantai Cermin

Parameter	Nilai
Luas wilayah	366,00 km ²
Jumlah penduduk	23.501 jiwa
Nagari Lolo	53,55% wilayah
Nagari Surian	46,45% wilayah

Kepadatan penduduk dan keberadaan infrastruktur vital pada zona rawan gempa memperbesar potensi kerugian ketika terjadi guncangan seismik, sebagaimana ditunjukkan dalam statistik bencana daerah (BPS, 2024; BPS Kabupaten Solok, 2024). Faktor sosial ini memperkuat urgensi analisis kerentanan seismik berbasis kondisi tapak lokal. Integrasi aspek fisik dan demografis menjadi pendekatan yang semakin ditekankan dalam studi kebencanaan modern (Liu & Wu, 2025).

Riwayat kejadian bencana di sekitar wilayah penelitian juga menunjukkan keterkaitan antara guncangan seismik dan bahaya turunan seperti longsor, khususnya pada zona dengan sedimen lunak dan lereng terjal. Kejadian longsor di Nagari Surian memperlihatkan bahwa respons tanah terhadap getaran seismik dapat memicu instabilitas lereng yang berdampak langsung pada permukiman dan infrastruktur (BPBD, 2024). Temuan ini sejalan dengan penelitian yang mengaitkan indeks kerentanan seismik dengan potensi longsor terinduksi gempa pada wilayah dengan kondisi geologi serupa (Awaliyah et al., 2023; Hasan et al., 2024). Hubungan ini menegaskan bahwa analisis HVSR tidak hanya relevan untuk bahaya gempa struktural, tetapi juga untuk bahaya geodinamik turunan. Konteks multi-bahaya ini memperluas signifikansi hasil penelitian.

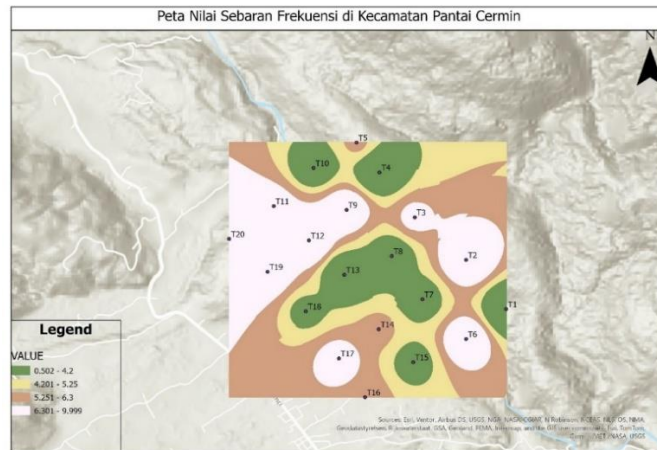
Dalam perspektif metodologis, pendekatan mikrotremor HVSR yang digunakan dalam penelitian ini sejalan dengan perkembangan internasional yang menempatkan metode tersebut sebagai standar de facto dalam evaluasi respons tapak lokal. Tinjauan metodologis terbaru menunjukkan bahwa HVSR memiliki keunggulan dalam mengidentifikasi frekuensi resonansi tanah dangkal secara konsisten pada berbagai konteks geologi (Molnar et al., 2025). Penerapan metode ini pada wilayah Pantai Cermin memperluas basis empiris penggunaan HVSR pada lingkungan pesisir dengan kompleksitas litologi tinggi. Validitas pendekatan ini juga diperkuat oleh kesesuaiannya dengan hasil mikrozonasi di wilayah tektonik aktif lain di Indonesia (Rohmah et al., 2023; Riyanto et al., 2025). Kerangka metodologis ini memberikan landasan kuat bagi interpretasi hasil kuantitatif pada subbagian berikutnya.

Keterkaitan antara sumber gempa, kondisi geologi, dan respons tanah lokal membentuk sistem sebab-akibat yang kompleks dalam menentukan tingkat kerentanan seismik wilayah. Pantai Cermin merepresentasikan contoh wilayah di mana magnitudo gempa menengah dapat menghasilkan dampak signifikan akibat kombinasi faktor tektonik dan tapak lokal (Utama et al., 2023). Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa wilayah dengan karakteristik serupa cenderung memiliki indeks kerentanan seismik yang tinggi meskipun berada di luar zona megathrust utama (Panjaitan et al., 2023; Permasari et al., 2025). Kondisi ini menegaskan pentingnya pendekatan berbasis data lapangan beresolusi lokal dalam evaluasi bahaya gempa. Kerangka konseptual ini menjadi dasar interpretasi hasil mikrotremor yang disajikan pada bagian selanjutnya.

Konteks geologi, seismotektonik, dan sosial wilayah Pantai Cermin menunjukkan tingkat kompleksitas yang tinggi dan relevan secara ilmiah untuk kajian kerentanan seismik. Integrasi peta wilayah, sistem patahan aktif, dan lokasi pengukuran mikrotremor memberikan dasar spasial yang kuat untuk analisis kuantitatif berbasis HVSR. Pendekatan ini konsisten dengan arah penelitian mutakhir yang menekankan pentingnya mikrozonasi seismik berbasis kondisi tapak lokal untuk mitigasi bencana (Liu et al., 2023; Ramadhan et al., 2026).

Karakteristik Respons Dinamik Tanah dan Implikasinya terhadap Kerentanan Seismik

Hasil analisis mikrotremor berbasis metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) di Kecamatan Pantai Cermin mengungkapkan heterogenitas respons dinamik tanah yang kuat, tercermin dari variasi nilai frekuensi dominan (f_0) antar titik pengukuran. Nilai frekuensi dominan berfungsi sebagai indikator utama ketebalan dan kekakuan lapisan sedimen, di mana nilai rendah merepresentasikan sedimen tebal dan lunak, sedangkan nilai tinggi mengindikasikan lapisan yang lebih kompak atau kedekatan dengan batuan dasar. Variasi ini menunjukkan bahwa kondisi bawah permukaan di wilayah penelitian tidak seragam, meskipun berada dalam satuan administratif yang sama. Secara fisik, perbedaan karakteristik ini berimplikasi langsung terhadap mekanisme resonansi tanah saat menerima gelombang seismik. Oleh karena itu, analisis frekuensi dominan menjadi landasan penting dalam evaluasi kerentanan seismik berbasis tapak lokal.



Gambar 1. Peta Sebaran Nilai Frekuensi Dominan (f_0) di Kecamatan Pantai Cermin

Peta sebaran frekuensi dominan menunjukkan bahwa zona dengan nilai f_0 rendah secara spasial terkonsentrasi pada area yang didominasi endapan aluvial muda dan sedimen lepas. Kondisi tersebut mencerminkan keberadaan lapisan sedimen tebal dengan impedansi seismik rendah, yang secara teoritis memiliki kecenderungan mengalami resonansi pada frekuensi rendah yang berbahaya bagi struktur bangunan. Sebaliknya, wilayah dengan nilai f_0 lebih tinggi berasosiasi dengan satuan batuan vulkanik dan intrusif yang lebih kaku, sehingga respons dinamik tanahnya relatif stabil. Pola ini memperkuat konsep bahwa litologi dan sejarah geologi lokal memainkan peran dominan dalam mengontrol respons seismik permukaan. Temuan ini konsisten dengan prinsip mikrozonasi seismik yang menekankan pentingnya variasi lokal dalam analisis bahaya gempa.

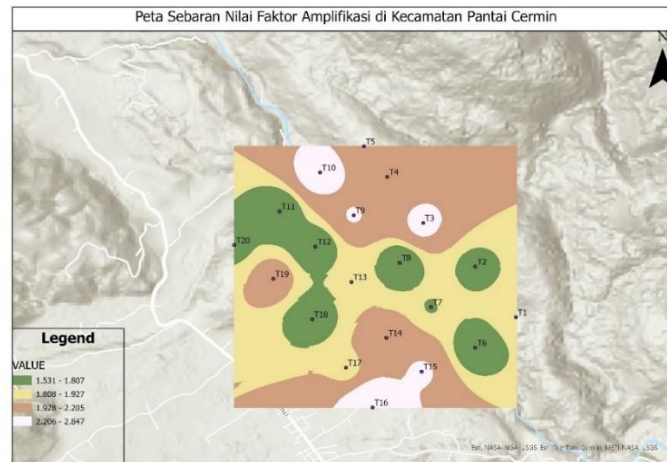
Untuk memperjelas hubungan antara parameter HVSr dan karakteristik respons tanah, dilakukan pengelompokan zona berdasarkan kombinasi nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Klasifikasi ini bertujuan menyederhanakan interpretasi respons dinamik tanah tanpa menghilangkan makna fisik parameter seismik yang diukur. Ringkasan karakteristik tersebut disajikan dalam Tabel 2 sebagai hasil sintesis data lapangan dan interpretasi kuantitatif penelitian ini. Tabel ini menjadi penghubung antara hasil numerik HVSr dan implikasi geotekniknya. Dengan demikian, pembacaan kerentanan seismik dapat dilakukan secara lebih sistematis dan terstruktur.

Tabel 2. Ringkasan karakteristik respons dinamik tanah berdasarkan parameter HVSr

Zona Geologi Dominan	Rentang f_0 (Hz)	Rentang A_0	Karakter Respons Tanah
Endapan aluvial muda	Rendah	Tinggi	Lunak, resonansi kuat, amplifikasi besar
Sedimen terlapuk	Menengah	Menengah	Transisi, respons moderat
Batuan vulkanik/granodiorit	Tinggi	Rendah	Kaku, respons stabil

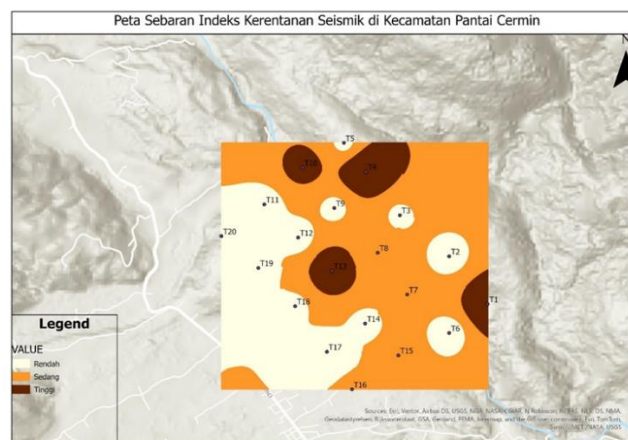
Sumber Data: Hasil pengolahan data mikrotremor penelitian ini.

Selain frekuensi dominan, distribusi faktor amplifikasi (A_0) menunjukkan pola spasial yang koheren dengan variasi kondisi litologi dan ketebalan sedimen. Nilai amplifikasi tinggi teridentifikasi terutama pada dataran aluvial dan kawasan permukiman yang berkembang di atas material tidak terkonsolidasi. Secara fisik, tingginya A_0 mencerminkan kontras impedansi seismik yang tajam antara lapisan permukaan dan lapisan bawah, sehingga energi gelombang seismik terperangkap dan diperkuat di dekat permukaan. Fenomena ini menjelaskan mengapa wilayah dengan magnitudo gempa menengah tetap dapat mengalami kerusakan signifikan. Dengan demikian, faktor amplifikasi menjadi parameter kunci dalam evaluasi risiko struktural kawasan terbangun.



Gambar 5. Peta sebaran faktor amplifikasi (A_0) Kecamatan Pantai Cermin

Integrasi antara frekuensi dominan dan faktor amplifikasi menghasilkan indeks kerentanan seismik (K_g) yang mampu merepresentasikan potensi deformasi tanah secara lebih komprehensif. Zona dengan nilai K_g tinggi ditandai oleh kombinasi sedimen lunak tebal dan amplifikasi besar, yang secara teoritis memiliki kapasitas regangan geser tinggi saat menerima beban seismik. Pola distribusi K_g memperlihatkan hubungan sebab-akibat yang jelas antara kondisi geologi lokal, respons dinamik tanah, dan tingkat kerentanan seismik. Hal ini menegaskan bahwa K_g merupakan parameter sintetik yang efektif untuk mengintegrasikan berbagai aspek respons tanah. Oleh karena itu, indeks ini relevan sebagai dasar kuantitatif dalam penyusunan mikrozonasi seismik.

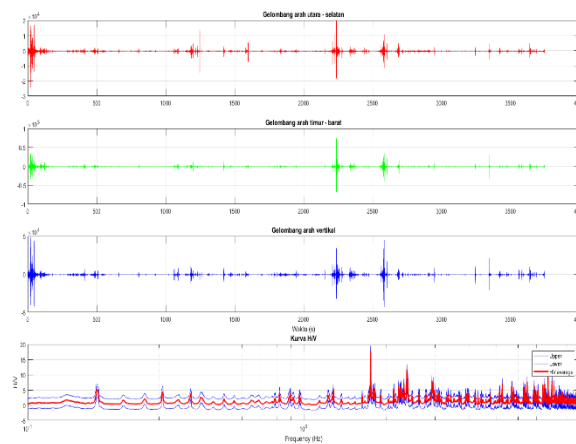


Gambar 6. Peta distribusi indeks kerentanan seismik (K_g) Kecamatan Pantai Cermin

Dari perspektif mitigasi bencana, zona dengan indeks kerentanan seismik tinggi berpotensi mengalami tingkat kerusakan struktural yang lebih besar ketika terjadi gempa bumi. Kondisi ini menjadi semakin kritis pada wilayah dengan kepadatan permukiman tinggi dan dominasi bangunan non-rekayasa. Informasi spasial mengenai variasi K_g memberikan dasar ilmiah untuk pengendalian pemanfaatan ruang, penentuan prioritas penguatan infrastruktur, serta perumusan standar desain bangunan yang adaptif terhadap kondisi tanah setempat. Dengan menempatkan respons dinamik tanah sebagai elemen utama analisis risiko, pendekatan berbasis mikrotremor terbukti memiliki relevansi praktis yang kuat. Temuan ini menegaskan peran HVSr sebagai alat empiris yang strategis dalam mendukung ketahanan seismik wilayah Pantai Cermin.

Integrasi Indeks Kerentanan Seismik terhadap Kerangka Geologi, Respons Dinamik Tanah, dan Risiko Wilayah

Integrasi indeks kerentanan seismik (K_g) yang diturunkan dari parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) memperlihatkan hubungan kausal yang kuat dengan kondisi geologi regional dan karakteristik bawah permukaan Kecamatan Pantai Cermin. Secara teoritis, nilai K_g merepresentasikan kapasitas regangan geser maksimum tanah ketika menerima eksitasi seismik, yang secara langsung dikontrol oleh kekakuan lapisan sedimen dan kontras impedansi seismik antar lapisan (Nakamura, 1989; Molnar et al., 2025). Pola spasial K_g tinggi yang teridentifikasi pada wilayah dengan dominasi endapan aluvial muda dan sedimen tidak terkonsolidasi konsisten dengan hasil mikrozonasi berbasis HVSr di berbagai wilayah rawan gempa di Indonesia dan kawasan tektonik aktif lainnya (Amirudin et al., 2023; Madrinovella, 2023; Yatini et al., 2023; Widyawarman et al., 2024).



Gambar 7. Grafik HVSr representatif pada beberapa titik pengamatan di Kecamatan Pantai Cermin

Karakteristik kurva HVSr pada Gambar 7 menunjukkan variasi bentuk spektrum yang signifikan, khususnya pada ketajaman puncak dan nilai amplitudo maksimum. Kurva dengan puncak tajam dan amplitudo tinggi mengindikasikan kontras impedansi seismik yang kuat antara lapisan sedimen lunak permukaan dan batuan dasar yang lebih kaku, suatu kondisi yang secara teoritis memicu resonansi tapak dan penguatan gelombang seismik (Bard, 1999; Molnar et al., 2025). Pola serupa dilaporkan pada studi HVSr di wilayah Palu, Aceh Besar, Yogyakarta, dan Semarang, di mana sedimen Kuartir tebal menghasilkan puncak HVSr dominan pada frekuensi rendah yang berasosiasi dengan tingkat kerusakan gempa yang tinggi (Asnawi et al., 2023; Maryani, 2024; Nurwidiyanto et al., 2023). Dengan demikian, grafik HVSr tidak hanya berfungsi sebagai alat diagnostik f_0 dan A_0 , tetapi juga sebagai indikator awal potensi ketidakstabilan dinamik tanah.

Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi pada zona tertentu menunjukkan kesesuaian dengan kerangka konseptual mikrozonasi seismik berbasis mikrotremor, di mana respons dinamik tanah dikendalikan oleh kombinasi sifat mekanik sedimen, ketebalan lapisan lunak, dan kondisi geologi setempat (Rohmah et al., 2023; Rudin & Safani, 2024). Studi-studi terbaru menunjukkan bahwa K_g memiliki korelasi kuat dengan potensi deformasi tanah, percepatan tanah maksimum, serta kecenderungan kerusakan bangunan dan kegagalan lereng (Awaliyah et al., 2023; Hasan et al., 2024; Liu et al., 2023; Permanasari et al., 2025). Dalam konteks Pantai Cermin, kesesuaian antara zona K_g tinggi dengan satuan aluvial pesisir mengindikasikan bahwa wilayah ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap guncangan seismik, sejalan dengan catatan kejadian gempa merusak di Kabupaten Solok dan sekitarnya (BNPB, 2021; BMKG, 2026).

Integrasi indeks kerentanan seismik dengan distribusi penggunaan lahan memperlihatkan bahwa sebagian zona K_g tinggi berimpit dengan area permukiman dan infrastruktur publik. Kondisi ini memperbesar tingkat risiko seismik karena tingginya eksposur elemen rentan di atas tanah dengan respons dinamik tidak menguntungkan. Pendekatan ini sejalan dengan kerangka penilaian risiko berbasis bahaya–kerentanan–eksposur yang banyak diterapkan pada evaluasi risiko gempa dan longsor

berbasis mikrotremor (Panjaitan et al., 2023; Sani, 2025; Pohan et al., 2025). Studi di Batu City, Bengkulu, dan Hanura menunjukkan bahwa kombinasi Kg tinggi dan kepadatan bangunan berkorelasi dengan peningkatan potensi kerusakan struktural dan kegagalan lereng akibat gempa (Hasan et al., 2024; Panjaitan et al., 2023; Permanasari et al., 2025).

Tabel 3. Integrasi indeks kerentanan seismik (Kg), kondisi geologi, dan penggunaan lahan di Kecamatan Pantai Cermin

Zona	Karakter Geologi Dominan	Nilai Kg Relatif	Penggunaan Lahan Utama	Tingkat Risiko Seismik
A	Endapan aluvial muda	Tinggi	Permukiman padat	Tinggi
B	Sedimen terlapuk	Menengah	Permukiman campuran	Menengah
C	Batuan vulkanik/keras	Rendah	Lahan terbuka/perkebunan	Rendah

Sumber Data: Hasil pengolahan data mikrotremor penelitian ini.

Sintesis pada Tabel 3 memperkuat argumen bahwa indeks kerentanan seismik dapat digunakan sebagai parameter strategis dalam penilaian risiko wilayah. Pendekatan serupa diterapkan pada studi mikrozonasi di Mamuju, Baubau, Kayu Aro Barat, dan Randugunting Dam, yang menunjukkan bahwa Kg efektif sebagai indikator awal dalam penentuan prioritas mitigasi dan perencanaan tata ruang berbasis risiko (Priadi et al., 2024; Rudin & Safani, 2024; Sefiyanti et al., 2024; Riyanto et al., 2025). Integrasi ini juga relevan dengan pengembangan metodologi baru yang menggabungkan data mikrotremor dengan intensitas seismik dan parameter makroseismik untuk pemetaan kerentanan tanah yang lebih komprehensif (Liu & Wu, 2025; Utama et al., 2023; Sapanur et al., 2024).

Kerentanan seismik di Kecamatan Pantai Cermin dikontrol oleh interaksi kompleks antara sejarah geologi, respons dinamik tanah, dan pola pemanfaatan ruang. Keselarasan antara hasil HVSr, indeks Kg, dan kondisi geologi regional yang merujuk pada Peta Geologi Lembar Painan (Gafoer et al., 1992) menegaskan validitas metodologi yang diterapkan. Integrasi ini menghasilkan kerangka mikrozonasi seismik yang tidak hanya konsisten secara teoritis, tetapi juga relevan secara praktis untuk mendukung pengurangan risiko bencana berbasis data empiris dan statistik wilayah (BPS Kabupaten Solok, 2024a; 2024b; BPBD Kabupaten Solok, 2024).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kerentanan seismik di Kecamatan Pantai Cermin dikontrol secara dominan oleh variasi respons dinamik tanah yang dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal. Analisis mikrotremor menggunakan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) berhasil mengidentifikasi parameter frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang bervariasi secara spasial, mencerminkan heterogenitas litologi dan ketebalan sedimen bawah permukaan. Integrasi kedua parameter tersebut dalam indeks kerentanan seismik (Kg) memberikan representasi komprehensif terhadap potensi deformasi tanah akibat guncangan gempa. Zona dengan nilai Kg tinggi berasosiasi kuat dengan endapan aluvial muda dan sedimen tidak terkonsolidasi, yang juga berimpit dengan area permukiman, sehingga meningkatkan tingkat risiko seismik wilayah. Keselarasan antara karakteristik HVSr, kondisi geologi, dan distribusi penggunaan lahan menegaskan bahwa pendekatan berbasis mikrotremor bersifat robust secara metodologis dan efektif sebagai dasar mikrozonasi seismik. Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam mendukung perencanaan tata ruang adaptif, penerapan desain bangunan tahan gempa, serta penguatan strategi mitigasi bencana di wilayah Pantai Cermin dan kawasan seismik serupa.

DAFTAR PUSTAKA

Amirudin, Madrinovella, I., & Sofian. (2023). Seismic Vulnerability Analysis Using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) Method on the West Palu Bay Coastline. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(02–2), 23–34. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.02-2.13879>

- Asnawi, Y., Muksin, U., Tarniati, Y. P., Simanjuntak, A. V., Rizal, S., & Syukri, M. (2023, January). Seismic vulnerability based on microtremor data and HVSR method in Krueng Raya, Aceh Besar. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2613, No. 1, p. 020008). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0119573>
- Awaliyah, I. A., Hadi, A. I., Farid, M., Fadli, D. I., & Akbar, A. J. (2023). *Microzonation Site Effects and Shear Strain during Earthquake Induced Landslide Using HVSR Measurement in Ulu Mana Sub-District , South Bengkulu Regency Indonesia*. 9(2), 592–599. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i2.2961>
- Hasan, M. F., Susilo, A., Suryo, E. A., Agung, P. A. M., Hiranyo, A. E., Pratiwie, D. L., ... & Maryanto, S. (2024). Soil Vulnerability Analysis Using the Microtremor Method for Mapping the Landslide Susceptibility Area in Batu City, Indonesia. *The Iraqi Geological Journal*, 18-31. <https://doi.org/10.46717/igj.57.2A.2ms-2024-7-12>
- Liu, P. H., & Wu, J. H. (2025). New Methodology for Assessing Seismic Ground Vulnerability Based on Microtremor and Taiwan Seismic Intensity Scale. *Journal of Earthquake Engineering*, 29(1), 209-223. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2415992>
- Liu, P. H., Wu, J. H., Lee, D. H., & Lin, Y. H. (2023). Detecting landslide vulnerability using anisotropic microtremors and vulnerability index. *Engineering Geology*, 323, 107240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107240>
- Madrinovella, I. (2023). Seismic vulnerability analysis using the horizontal to vertical spectral ratio (HVSR) method on the West Palu Bay Coastline. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(02-2), 23-34. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.02-2.13879>
- Maryani, T. (2024). Microtremor Microzonation Based on Seismic Vulnerability Index (Kg) Using HVSR (Horizontal To Vertical Spectral Ratio) Method in Kapanewon Berbah, Sleman, DI Yogyakarta: Mikrozonasi Mikrotremor Berdasarkan Indeks Kerentanan Seismik (Kg) Menggunakan Metode HVSR (Horizontal To Vertical Spectral Ratio) di Kapanewon Berbah, Sleman, DI Yogyakarta. *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, 6(2), 64-73. <https://doi.org/10.14421/physics.v6i2.5157>
- Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P., Castellaro, S., Cornou, C., Cox, B., Guillier, B., Hassani, B., Kawase, H., Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P., & Castellaro, S. (2025). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method To cite this version : HAL Id : hal-04973576 A review of the microtremor horizontal - to - vertical spectral ratio (MHVSR) method. In *Journal of Seismology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9>
- Nurwidiyanto, M. I., Yulianto, T., Yuliyanto, G., & Widada, S. (2023, June). Estimation micro zonation to earthquake vulnerability based on HVSR microtremor method in the transition between the lower and upper of Semarang Area. In *I1TH INTERNATIONAL SEMINAR ON NEW PARADIGM AND INNOVATION ON NATURAL SCIENCES AND ITS APPLICATION (ISNPINSA): Developing Science and Technology Toward the New Normal Era* (Vol. 2738, No. 1, p. 030028). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0141933>
- Panjaitan, A. P., Saragih, R., Hutahuruk, A., & Suhendra, S. (2023). Microzonation of Landslide Potential Areas Using the Microtremor Method in the North Bengkulu-Lebong Regency. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 20(2), 120-128. <https://dx.doi.org/10.20527/flux.v20i2.14957>
- Permanasari, I. N. P., Ba'asyir, I. N., Setiawan, M. R., Pardede, I., & Monica, Y. (2025). Landslide Vulnerability Analysis Based On The Seismic Vulnerability Index Using The Hvsr Microtremor Method On Cliff Areas In Hanura Village, Teluk Pandan District, Pesawaran Regency. *Indonesian Physical Review*, 8(3), 827-839. <https://doi.org/10.29303/Ipr.V8i3.484>
- Pohan, A. F., Putri, Y., Algusduri, N., Islami, K. P., Fitri, I., Fiona, G., Deshafa, A. F., Fajri, R., Erawati, Y., Rahmah, R. A., Jannah, A., Nanda, F. S., & Zai, F. (2025). Vulnerability Analysis Of Andalas University Library Building Using Microtremor Hvsr Method. *Journal Of The Physical Society Of Indonesia*, 1(1), 36–44. <https://doi.org/10.35895/Jpsi.1.1.36-44.2025>
- Priadi, R., Arsyad, M., & Susanto, A. (2024). Evaluasi Kerentanan Seismik Wilayah Kota Mamuju Pasca Gempa Bumi 15 Agustus 2021 Menggunakan Data Microtremor. *Jurnal Fisika Unand*, 13(1), 75-81. <https://doi.org/10.25077/Jfu.13.1.75-81.2024>

- Ramadhan, Y. D., Situmeang, A. D., Saputra, M. R., Cholisatin, S. N., Asyfiya, D. Z., Safrian, A. H., ... & Realita, A. (2026). Analysis Of Soil Dynamics And Ground Movement Vulnerability Using The Hvsr Method Based On Microtremor Measurements In The Sempu Area, Pasuruan. *Indonesian Physical Review*, 9(1), 79-93. <https://doi.org/10.29303/Ipr.V9i1.561>
- Riyanto, D. P., Dhanardono, B., Suhardi, Prasetyo, W., Apriyoga, W., & Yulianto, G. (2025). The HVSR analysis for determining the seismic vulnerability and soil characteristics of the Randugunting Dam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1467(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1467/1/012011>
- Rohmah, S., Susilo, A., Yudianto, D., Hisyam, F., & Suryo, E. A. (2023, May). Analysis of Seismic Vulnerability Index Based on Microtremor Investigation (Case Study of Majangtengah Village, Dampit, Malang Regency). In *12th International Conference on Green Technology (ICGT 2022)* (pp. 149-158). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-148-7_16
- Rudin, R., & Safani, J. (2024). Interpretasi Data Mikrotremor Melalui Analisis Horizontal To Vertical Spectral Ration (HVSR) untuk Mikrozonasi Bahaya Gempa Seismik di Kota Baubau. *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, 06(02), 148–162. <https://doi.org/10.56099/jrgi.v6i02.92>
- Sani, M. A. (2025). Microtremor based seismic vulnerability assessment of UIN mataram campus II, Lombok. *Compton: Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika*, 12(1), 106-120. <https://doi.org/10.30738/cjipf.v12i1.19620>
- Sapanur, D. M., ismul Hadi, A., & Refrizon, R. (2024). Seismic Vulnerability Index Mapping Based on PGA, GSS, and MMI Values in Pasar Ujung Kepahiang Village. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 10(2), 387-394. <https://doi.org/10.29303/jpft.v10i2.7440>
- Sefiyanti, F., Sucitra Amin, S., Lucy Rest, I., Hamdi, H., Astuti, P., Amalina Fauziyah, A., Fadlan Risky, K., Lefdiana, A., Randa Pranata, A., & Anggia Harahap, I. (2024). Identifikasi Kerentanan Tanah Dan Percepatan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor Di Kawasan Kayu Aro Barat. *Journal Online of Physics*, 10(1), 88–93. <https://doi.org/10.22437/jop.v10i1.38193>
- Utama, W., Indriani, R. F., & Garini, S. A. (2023). Analysis of the Effect of Local Magnitude on Peak Ground Acceleration and Seismic Vulnerability Index for Geothermal Field Monitoring Using Microearthquake. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(10), 7855-7864. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.3743>
- Widyawarman, D., Sismanto, S., & Purnama, A. Y. (2024). Mapping Earthquake Vulnerable Areas Based on Microtremor Measurements Near Kebumen City. *Malaysian Journal of Science*, 38-43. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol43no4.5>
- Yatini, Y., Kustanto Putra, A., & Paripurno, E. T. (2023). Application of HVSR Method on Microtremor Data for Analysis of Earthquake Potential in Candipuro District, Lumajang, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(4), 288–294. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.4.13460>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan G. (BMKG). (2026). *Katalog Gempa Bumi Signifikan & Merusak Tahun 1821-2025*.
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah. (2024). *Tanah longsor di Nagari Surian*. Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Solok. <https://bpbdb.solokkab.go.id/artikel/tanah-longsor-di-nagari-surian#>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Kecamatan Pantai Cermin Dalam Angka 2024* (BPS Kabupaten Solok (ed.); Issue 14). BPS Kabupaten Solok/BPS-Statistics Solok Regency. <https://solokkab.bps.go.id/>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Solok. (2024). *Jumlah desa/kelurahan yang mengalami bencana alam menurut kecamatan di Kabupaten Solok*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Solok. <https://solokkab.bps.go.id/id/statistics-table/3/YmtNd1RGQkhMelpTV213eFVEUjRZV6k4wVmtadGR6MDkjMyMxMzAz/jumlah-desa-kelurahan-yang-mengalami-bencana-alam-menurut-kecamatan-di-kabupaten-solok.html?year=2024>
- Bencana, B. N. P. (2021). Edukasi kebencanaan: Tiga tahun lalu, gempa M5,5 guncang Kabupaten Solok. *Badan Nasional Penanggulangan Bencana*. <https://www.bnpb.go.id/berita/-edukasi-kebencanaan-tiga-tahun-lalu-gempa-m5-5-guncang-kabupaten-solok>
- Gafoer, S., Amin, T. C., & Sidarto. (1992). *Peta Geologi Lembar Painan, Sumatera Barat (Skala*

1:250.000). Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi