



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Analisis Kerentanan Seismik dan Ketebalan Sedimen di Zona Sesar dan Kaldera Bakauheni, Lampung Selatan

A Zaenudin ^{a,1}, Rustadi ^a, S Erfani ^a, I.G.B Darmawan ^a, Fajriyanto ^b, dan A Farduwin ^c

^a Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Jl Sumanteri Boronegoro No. 1, Rajabasa, Bandar Lampung

^b Teknik Geodesi, Universitas Lampung, Jl Sumanteri Boronegoro No. 1, Rajabasa, Bandar Lampung

^c Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Jl Terusan Riyakudu, Lampung Selatan

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 11/11/2024
Direvisi 13/01/2025
Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:
HVSr
Sesar aktif
Kaldera purba
Sedimen
Bakauheni

ABSTRAK

Kawasan Strategis Nasional Selat Sunda, khususnya Pelabuhan Bakauheni, merupakan Kawasan Strategis sebagai pelabuhan Pulau Jawa-Sumatera yang rentan terhadap aktivitas vulkanik Anak Gunung Krakatau (AGK), Sesar Krakatau, Sesar Pantai Timur dan sesar-sesar kecil di Bakauheni, dan keberadaan kaldera-kaldera purba. Kondisi batuan akibat gangguan gempa dan kaldera perlu dikarakterisasi dan dianalisis, terkait kerentanan seismik dan ketebalan sedimen tersebut, jika teraktifasi gempa. Uji kerentanan seismik diukur dan dianalisis dengan metode mikrotremor, yaitu metode HVSr (Horizontal-Vertical-Signal-Ratio). HVSr atau H/V dilakukan dengan cara menghitung rasio antara komponen horisontal (NS dan EW) dengan komponen vertikal dalam domain frekuensi (f). Tujuan khusus dari penelitian ini adalah untuk karakterisasi dan korelasi keberadaan sesar, dan kaldera purba Bakauheni, lapisan sedimen, yang dianalisis dengan Frekuensi Alamiah (f₀), nilai Vs₃₀, Faktor Amplifikasi (A₀), dan Indeks Kerentanan Seismik (K_g). Hasil perhitungan HVSr menghasilkan nilai f₀ pada rentang <2,5 Hz (lapisan sangat tebal), 2,5 – 4 Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan 10 – 30 meter) dan 4 – 6,67 Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan 5 – 10 meter). Nilai f₀ tersebut menunjukkan adanya sedimen yang relatif tebal di kaldera. Dari hasil inversi PSO HVSr, dapat di ekstraksi kecepatan gelombang geser (Vs) yang menghasilkan klasifikasi tanah sangat lunak (0 – 175 m/s), tanah lunak (175 – 350 m/s), tanah sedang dan batuan lunak (350 – 750 m/s), batuan sedang hingga keras (750 – 1500 m/s) dan batuan sangat keras (>1500 m/s). Nilai amplifikasi yang terbagi atas dua kategori, yakni <3 kali dan 3-6 kali. Indeks kerentanan seismik terbagi atas 3 kategori, yakni nilai K_g sebesar <3 1/cm s² (rendah), 3 – 6 1/cm s² (sedang) dan >6 1/cm s² (tinggi). Hasil HVSr menunjukan bahwa ketebalan sedimen dan kerentanan seismik di Bakauheni tidak terkait langsung dengan sesar, tetapi terkait dengan keberadaan kaldera-kaldera purba. Sangat penting untuk merancang struktur bangunan yang adaptif terhadap aktivitas seismik dan keberadaan lapisan tebal di kaldera-kaldera purba tersebut.

¹ Ahmad Zaenudin.

E-mail: ahmad.zaenudin@eng.unila.ac.id

1. Pendahuluan

Selat Sunda sejak lama telah menjadi Kawasan yang sangat penting dan strategis. Kawasan Selat Sunda merupakan Kawasan yang sangat aktif dari segi dinamika bumi, termasuk aktivitas sesar-sesar besar disekitar Selat Sunda, yaitu Sesar Semangko, Sesar Krakatau, Sesar Pantai Timur dan Sesar Panjang, yang menunjukkan aktivitas kegempaan yang aktif. Sesar daerah Selat Sunda dan sekitarnya ditafsir pada citra, kecuali Sesar Krakatau diinterpretasi data pusat gempa oleh [3]. Akibat dari pergerakan dari ketiga sesar aktif ini menghasilkan pola distribusi seismisitas yang unik yaitu distribusi seismisitas yang tinggi di sepanjang Sesar Krakatau dan beberapa seismisitas di Sesar Panjang dan Sesar Pantai Timur [4, 5, 6]. Berdasarkan catatan sejarah gempa tersebut dapat ditarik beberapa poin yaitu; terdapat lima gempa dengan magnitudo <5 yang terjadi di daerah Bakauheni dalam selang beberapa dekade terakhir. Ada dua gempa (1991 dan 1998) yang masuk dalam kategori gempa dalam yang dimungkinkan masuk kategori gempa *intraslab*. Dan ada tiga gempa dangkal (2000, 2015, 2017) yang diproyeksikan melewati Sesar Peterjajar. Keberadaan gempa tahun 2015 dan 2017 menunjukkan adanya keaktifan Sesar Peterjajar dalam beberapa tahun terakhir [30].

Menurut Bronto dan Poedjoprajitno (2010), berdasarkan analisis penginderaan jauh di Lampung bagian selatan terdapat 3 (tiga) kelompok gunung api purba yang terdiri dari Kelompok Pra-Rajabasa, Kelompok Kalianda, dan Kelompok Bakauheni. Kelompok Pra-Rajabasa di tandai adanya penampakan gawir setengah melingkar yang melingkupi Kawasan Gunung api Rajabasa di sebelah Tenggara dan penampakan punggung perbukitan berpola semi memancar di sebelah Timur. Kaldera yang terdapat dalam kelompok Pra-Rajabasa terdapat 4 kaldera. Sementara itu, kelompok Kalianda berada di sebelah utara kelompok Pra-Rajabasa, dimana sebagian besar batuan gunung apinya tersebar ke arah Barat. Pada kelompok Kalianda terdapat 1 kaldera besar yang masih dalam perkiraan. Kemudian, kelompok Gunung api purba Bakauheni ditandai dengan susunan perbukitan yang terdiri dari lava andesit. Sebagian pulau-pulau di sekitar Pelabuhan Bakauheni juga tersusun oleh batuan andesit, kecuali Pulau Kandangbalak yang tersusun oleh Tuf Lampung. Adanya batuan andesit sebagai penyusun pulau-pulau di sekitar Bakauheni mendukung hasil analisis penginderaan jauh bahwa pulau-pulau tersebut adalah bagian dari gunung api purba kelompok Bakauheni. Lava andesit di erupsi pada tahap

pembangunan kerucut gunung api komposit di dalam kelompok Bakauheni. Keberadaan tuf diyakini sebagai hasil erupsi eksplosif atau pembentukan kaldera sebagai tahap penghancuran gunung api purba. Bentuk kaldera sebagai penciri gunung api purba pada kelompok Bakauheni ini terdapat 7 kaldera.

Karena efek gempa bumi pada zona sesar dan kaldera ini sangat berbahaya, maka identifikasi dan pemantauan kerentanan seismik perlu dilakukan secara lebih komprehensif. Keberadaannya mutlak perlu diketahui guna meminimalkan risiko akibat gempa yang timbul apabila sesar aktif ini. Hal yang perlu diketahui meliputi lokasi, sebaran, zona rentan seismik, dan karakteristik kerentanan seismik di zona tersebut, seperti yang telah dilakukan oleh.....

Data tersebut diperlukan untuk menganalisis bahaya guncangan gempa, baik pada batuan dasar maupun tanah permukaan, sehingga risiko akibat gempa dan mitigasinya dapat diperkirakan. Dan yang lebih penting lagi, ada zonasi daerah terdampak gempa sebelumnya disekitar sesar aktif sebagai akibat aktivitas kegempaan sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh

Zonasi akibat gempa dan kemungkinan zona yang akan terdampak gempa berikutnya kita sebut sebagai zonasi rawan bencana geologi akibat tektonik. Dengan identifikasi dan zonasi ini, diharapkan kita dapat karakterisasi aktifitas sesar dalam kaitannya dengan zona rawan bencana geologi di masa yang akan datang. Pada artikel ini akan dikarakterisasi efek keberadaan sesar, dan kaldera purba Bakauheni, berdasarkan Frekuensi Alamiah (f_0), nilai V_{s30} , Faktor Amplifikasi (A_0), dan Indeks Kerentanan Seismik (K_g) untuk menganalisa kerentanan seismiknya dari pengukuran Metode mikrotremor HVSR (Horizontal-Vertical-Signal-Ratio).

Metode mikrotremor HVSR (Horizontal-Vertical-Signal-Ratio) merupakan metode non-destruktif untuk studi tentang respons seismik lokal dan melakukan analisis respon kerentanan tanah terhadap kegempaan. Keuntungan metode HVSR, dibandingkan dengan metode geofisika lainnya adalah pengukurannya non-invasif, sederhana dan cepat dan dapat mengestimasi langsung efek seismik lokasi, misalnya; fundamental frekuensi alami (f_0) dan amplitudo puncak HVSR, yang mengidentifikasi zona seismik yang berpotensi berbahaya dengan biaya yang wajar.

Metode ini memanfaatkan sinyal ambient seismic noise (mikrotremor) yang terekam dalam tiga komponen seismograf (NS, EW dan V). Selanjutnya untuk mendapatkan nilai HVSR atau H/V dilakukan dengan

cara menghitung rasio antara komponen horisontal (NS dan EW) dengan komponen vertikal dalam domain frekuensi (f). Dari nilai rasio tersebut, akan diperoleh nilai frekuensi dominan (f_0) dan nilai amplitudo puncak (amplifikasi). Nilai-nilai tersebutlah yang kemudian digunakan untuk analisis kondisi geologi bawah permukaan.

[2] menyatakan bahwa metode HVSR secara umum digunakan untuk tiga tujuan yang meliputi; (a) evaluasi F_0 yang berkorelasi dengan bahaya akibat gempa bumi, (b) evaluasi variasi resonansi yang mencakup area luas untuk tujuan mikrozonasi dan mitigasi bencana (seismic-risk mitigation) serta (c) evaluasi lapisan sedimen meliputi ketebalan dan kedalaman lapisan batuan dasar (badrock). Dalam aplikasinya, metode HVSR mencakup berbagai disiplin bidang keilmuan, meliputi geologi [7], studi seismologi dan mikrozonasi [8, 9,10], teknik [11, 12], investigasi lapisan tanah dan sesar [13, 15, 15, 16, 17, 18], dan bahkan di bidang arkeologi [19, 20, 21, 22, 23].

2. Metodologi

Pada penelitian ini data mikrotremor yang digunakan berupa data hasil pengukuran lapangan. Pengambilan data mikrotremor ini meliputi 61 titik ukur yang berada di wilayah Kecamatan Bakauheni dan sekitarnya. Data pengukuran HVSR direkam 25 – 30 menit dilakukan pengolahan menggunakan *software Geopsy* dengan frekuensi antara 0,5 – 15 Hz dan lebar jendela 30 detik. Komponen vertikal, komponen horizontal Utara-Selatan dan komponen horizontal Timur-Barat. Tahapan selanjutnya yakni melakukan *windowing* pada rekaman mikrotremor berupa kotak berwarna, proses ini digunakan untuk memilih sinyal yang bebas dari gangguan (*noise*). Satu warna mewakili satu *window* (jendela) dengan lebar kotak dalam satuan detik. Jumlah *window* tergantung dari sinyal yang masuk dalam kategori data dan terhindar dari *noise*. Kurva HVSR yang terbentuk dari hasil *windowing* ditampilkan dari semua *window* sesuai dengan warna *window*.

Topologi kurva HVSR hasil pengukuran terdiri dari 3 (tiga) bentuk kurva yakni Pertama, kurva HVSR dengan satu puncak, artinya terdapat kontras impedansi pada suatu kedalaman tertentu sehingga gelombang mengalami amplifikasi. Kedua, kurva HVSR dengan dua puncak, disebabkan Keadaan geologi di suatu daerah berupa sedimen tidak kompak dipermukaan, kemudian paling di bawahnya tersusun oleh sedimen yang sudah kompak, dan paling bawah tersusun oleh *bedrock* yang sangat kompak. Ketiga, kurva HVSR

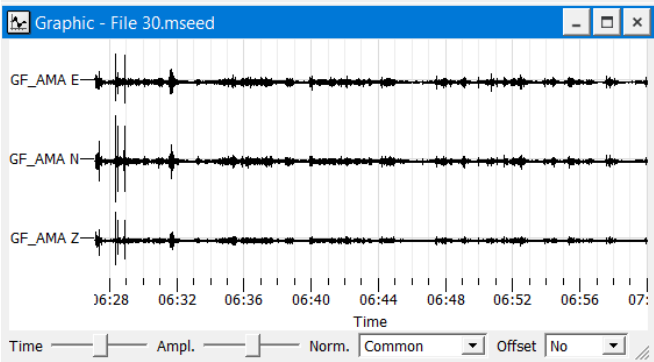
puncak lebar, berhubungan dengan cekungan suatu lembah atau *bedrock* yang miring, kemungkinan adanya variasi struktur sedimen *bedrock* (SESAME, 2004).

Data HVSR ini digunakan untuk melihat karakteristik tanah berdasarkan frekuensi dominan (f_0), periode dominan (T_0), V_{s30} , faktor amplifikasi dan indeks kerentanan seismik. Untuk menghasilkan parameter-parameter tersebut dilakukan pengolahan dengan memisahkan data *channel* x, y dan z. Kemudian di input dalam *software* geopsy. Setelah data terinput, dilakukan pengaturan parameter H/V sehingga menghasilkan nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Hasil pengolahan HVSR digambarkan dalam **Tabel 1**.

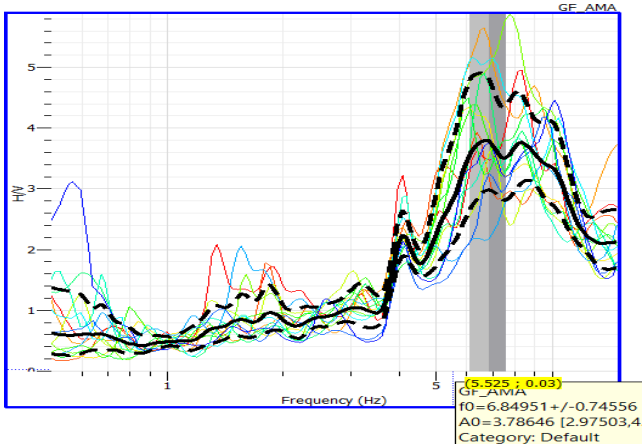
3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini data mikrotremor yang digunakan berupa data hasil pengukuran lapangan. Pengambilan data mikrotremor ini meliputi 61 titik ukur yang berada di wilayah Kecamatan Bakauheni dan sekitarnya. Data pengukuran HVSR direkam 25 – 30 menit dilakukan pengolahan menggunakan *software Geopsy* dengan frekuensi antara 0,5 – 15 Hz dan lebar jendela 30 detik. Contoh seismogram mikrotremor hasil rekaman pada daerah penelitian diperlihatkan pada Gambar 1. Komponen vertikal, komponen horizontal Utara-Selatan dan komponen horizontal Timur-Barat. Tahapan selanjutnya yakni melakukan *windowing* pada rekaman mikrotremor berupa kotak berwarna, proses ini digunakan untuk memilih sinyal yang bebas dari gangguan (*noise*). Satu warna mewakili satu *window* (jendela) dengan lebar kotak dalam satuan detik. Jumlah *window* tergantung dari sinyal yang masuk dalam kategori data dan terhindar dari *noise*. Contoh *windowing* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

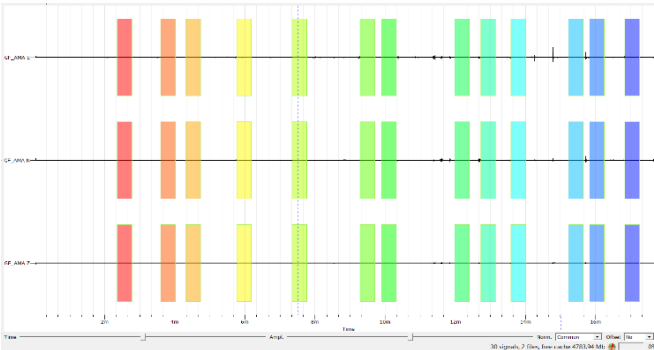
Kurva HVSR yang terbentuk dari hasil *windowing* ditampilkan dari semua *window* sesuai dengan warna *window*. Contoh kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor di daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 3. Topologi kurva HVSR hasil pengukuran terdiri dari 3 (tiga) bentuk kurva yakni Pertama, kurva HVSR dengan satu puncak, artinya terdapat kontras impedansi pada suatu kedalaman tertentu sehingga gelombang mengalami amplifikasi. Kedua, kurva HVSR dengan dua puncak, disebabkan Keadaan geologi di suatu daerah berupa sedimen tidak kompak dipermukaan, kemudian paling di bawahnya tersusun oleh sedimen yang sudah kompak, dan paling bawah tersusun oleh *bedrock* yang sangat kompak. Ketiga, kurva HVSR puncak lebar, berhubungan dengan cekungan suatu lembah atau *bedrock* yang miring, kemungkinan adanya variasi struktur sedimen *bedrock* (SESAME, 2004).



Gambar 1. Rekaman mikrotremor tiga komponen (GF-AMA E, GF-AMA E, GF-AMA E).



Gambar 3. Kurva HVSR.



Gambar 2. Windowing sinyal mikrotremor.

Data HVSr ini digunakan untuk melihat karakteristik tanah berdasarkan frekuensi dominan (f_0), periode dominan (T_0), VS30, faktor amplifikasi dan indeks kerentanan seismik. Untuk menghasilkan parameter-parameter tersebut dilakukan pengolahan dengan memisahkan data channel x, y dan z. Kemudian di input dalam Software Geopsy. Setelah data terinput, dilakukan pengaturan parameter H/V sehingga menghasilkan nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Hasil pengolahan HVSr digambarkan dalam Tabel 2.

3.1. Analisis peta persebaran nilai frekuensi dominan (f_0)

Nilai frekuensi dominan dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan pada daerah penelitian. Berdasarkan peta persebaran nilai frekuensi dominan pada Gambar 4, dapat diinterpretasikan bahwa daerah penelitian memiliki nilai frekuensi dominan berada di empat kategori yaitu f_0 sebesar 6,7 – 13,83 Hz ditunjukkan oleh warna kuning, 4 – 6,7 Hz ditunjukkan oleh warna cokelat, 2,5 – 4 Hz ditunjukkan oleh warna hijau dan <2,5.Hz ditunjukkan oleh warna biru. Keempat kategori tersebut di klasifikasikan dengan batuan keras, batuan sedimen permukaan 5 – 10 meter, batuan sedimen permukaan 10 – 30 meter dan batuan sedimen sangat tebal (Kanai, 1983).

Tabel 1. Tabel f_0 , T_0 , Vs30, Aplifikasi dan Kg

N O.	Titik HVS R	f_0 (Hz)	T_0 (deti k)	Vs30 (m/s)	Amplifikasi (Kali)	Kg
1	M1	6.84	0.1462	820.8	3.78	2.088947
2	M2	9.58	0.1044	1149.6	1.44	0.216451
3	M4	11.06	0.0904	1327.2	1.25	0.141275
4	M5	12.54	0.0797	1504.8	1.15	0.105463
5	M7	9.2	0.1087	1104	2.24	0.545391
6	M8	7.42	0.1348	890.4	1.06	0.151429
7	M9	13.58	0.0736	1629.6	1.22	0.109602
8	M10	12.7	0.0787	1524	2.17	0.37078
9	M11	11.64	0.0859	1396.8	2.49	0.532655
10	M13	11.72	0.0853	1406.4	0.9	0.069113
11	M14	9.31	0.1074	1117.2	2.68	0.771472
12	M15	10.9	0.0917	1308	2.32	0.493798
13	M16	11.13	0.0898	1335.6	0.74	0.0492
14	M17	2.56	0.3906	307.2	1.34	0.701406
15	M18	7.22	0.1385	866.4	2.56	0.907701
16	M23	6.79	0.1473	814.8	2.59	0.987938
17	M24	8.39	0.1192	1006.8	1.76	0.369201
18	M25	13.05	0.0766	1566	4.06	1.263111

N O.	Titik HVS R	f_0 (Hz)	T_0 (deti k)	Vs30 (m/s)	Amplifik asi (Kali)	Kg
19	M26	3.89	0.2571	466.8	1.47	0.555501
20	M27	1.48	0.6757	177.6	0.94	0.597027
21	M28	8.74	0.1144	1048.8	2.05	0.480835
40	M30	6.72	0.1488	806.4	1.62	0.390536
41	M33	6.58	0.1520	789.6	0.99	0.148951
42	M35	11.05	0.0905	1326	1.9	0.326697
43	M37	13.18	0.0759	1581.6	3.21	0.781798
44	M39	7.44	0.1344	892.8	1.72	0.397634
45	M40	7.27	0.1376	872.4	1.76	0.42608
46	M41	5.17	0.1934	620.4	2.78	1.494855
47	M43	9.54	0.1048	1144.8	1.28	0.17174
48	M46	11.74	0.0852	1408.8	2.33	0.462428
49	M47	11.77	0.0850	1412.4	2.06	0.360544
50	M48	7.16	0.1397	859.2	1.79	0.4475
51	M49	8.54	0.1171	1024.8	1.82	0.387869
52	M50	10.83	0.0923	1299.6	1.66	0.254441
53	M52	9.44	0.1059	1132.8	2.41	0.615265
54	M53	8.47	0.1181	1016.4	0.99	0.115714
55	M54	5.1	0.1961	612	0.82	0.131843
56	M56	3.69	0.2710	442.8	4.61	5.759377
57	M57	3.52	0.2841	422.4	4.6	6.011364
58	M58	7.88	0.1269	945.6	1.92	0.467817
59	M59	7.99	0.1252	958.8	1.93	0.466195
60	M60	10.87	0.0920	1304.4	2.34	0.503735
61	M61	12.48	0.0801	1497.6	3.51	0.987188
22	M62	7.24	0.1381	868.8	3.31	1.513273
23	M63	8.74	0.1144	1048.8	3.33	1.268753

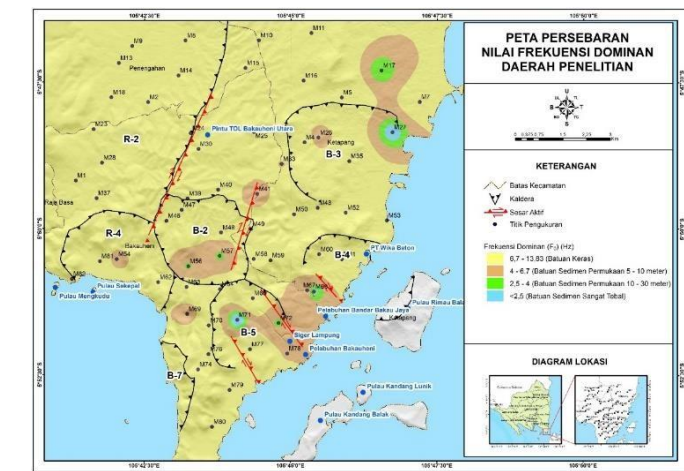
N O.	Titik HVS R	f_0 (Hz)	T_0 (deti k)	Vs30 (m/s)	Amplifik asi (Kali)	Kg
24	M64	8.42	0.1188	1010.4	3.21	1.223765
25	M65	12.1	0.0826	1452	1.22	0.123008
26	M67	6.67	0.1499	800.4	2.96	1.313583
27	M68	1.6	0.6250	192	5.8	21.025
28	M69	5.72	0.1748	686.4	1.55	0.420017
29	M70	8.71	0.1148	1045.2	1.1	0.138921
30	M71	0.64	1.5625	76.8	0.87	1.182656
31	M72	3.7	0.2703	444	1.81	0.885432
32	M74	10.87	0.0920	1304.4	1.32	0.160294
33	M76	8.79	0.1138	1054.8	1.82	0.376837
34	M77	10.46	0.0956	1255.2	2.34	0.52348
35	M78	6.68	0.1497	801.6	1.45	0.314746
36	M79	6.97	0.1435	836.4	1.36	0.265366
37	M80	13.84	0.0723	1660.8	1.43	0.147753
38	M81	11.49	0.0870	1378.8	3.61	1.134212
39	M82	12.78	0.0782	1533.6	3.95	1.220853

Berdasarkan persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) diketahui bahwa kaldera purba dengan simbol B-2, B-3, B-5, dan R-4 berada dalam empat kategori. Sedangkan kaldera purba dengan simbol R-2 dan B-4 hanya masuk dalam kategori nilai f_0 sebesar 6,7 – 13,83 Hz (Batuan keras).

3.2. Analisis peta persebaran nilai periode dominan (T_0)

Nilai periode dominan digunakan untuk mengindikasikan karakter lapisan batuan yang ada pada daerah penelitian. Berdasarkan peta persebaran nilai periode dominan pada Gambar 5, dapat diinterpretasikan bahwa daerah penelitian memiliki nilai periode dominan yang terbagi atas lima kategori, yakni T_0 sebesar 0,07 – 0,15 detik, 0,15 – 0,25 detik, 0,25 – 0,4 dan >0,4 detik. Kelima kategori tersebut di klasifikasikan dengan karakter lapisan batuan keras, sedang, lunak dan sangat lunak (Kanai, 1983).

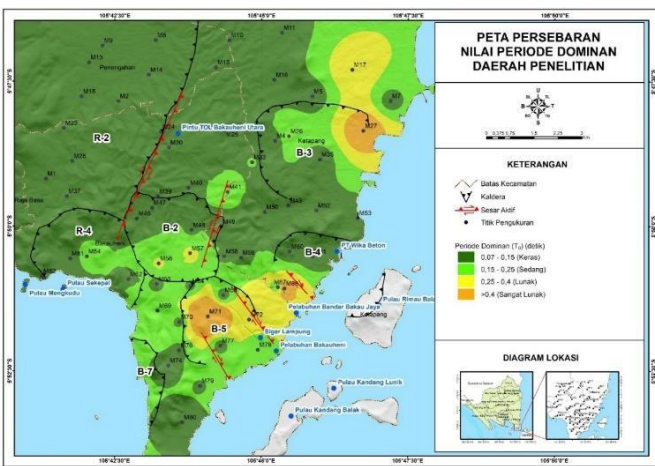
Berdasarkan persebaran nilai T0 diketahui kaldera purba daerah penelitian masing-masing masuk kedalam lima kategori tersebut.



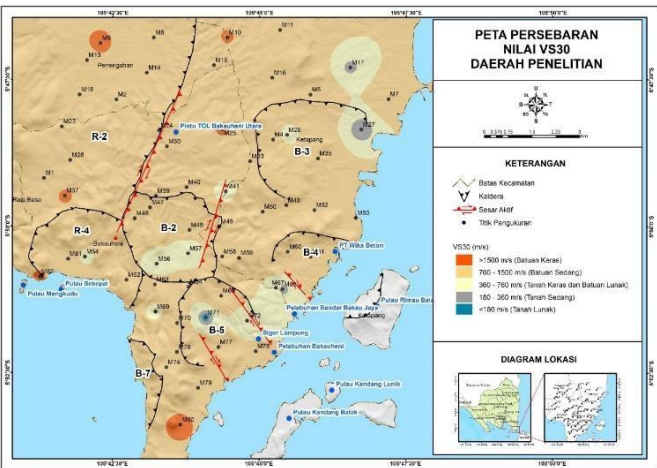
Gambar 4. Peta persebaran frekuensi dominan (f0)

3.3. Analisis peta persebaran nilai vs30

Nilai Vs30 merupakan gambaran dari sifat struktur tanah. Berdasarkan peta persebaran nilai Vs30 yang dapat dilihat pada Gambar 6. Pada daerah penelitian memiliki nilai kecepatan gelombang geser pada kedalaman 30 meter dengan lima kategori yakni, sebesar <180 m/s (batuan keras), 180 – 360 m/s (batuan sedang), 360 – 760 m/s (tanah keras dan batuan lunak), 760 – 1500 m/s (tanah sedang) dan >1500 m/s (tanah lunak).



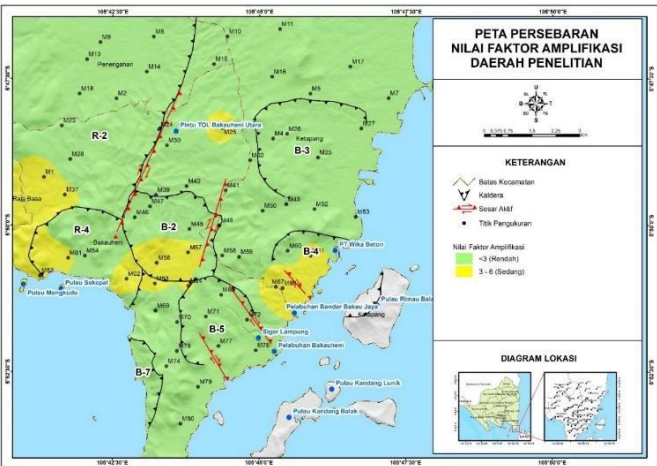
Gambar 5. Peta persebaran nilai periode dominan (T0)



Gambar 6. Peta persebaran nilai vs30

3.4. Analisis peta persebaran nilai amplifikasi

Berdasarkan peta persebaran nilai amplifikasi yang dapat dilihat pada Gambar 7, dapat diinterpretasikan bahwa pada daerah penelitian memiliki nilai amplifikasi yang terbagi atas dua kategori, yakni <3 kali dan 3-6 kali. Kategori <3 kali ditunjukkan dengan warna hijau pada peta sehingga dapat dikatakan pada daerah penelitian dengan resiko bencana kegempaan rendah. Selanjutnya, 3-6 kali ditunjukkan dengan warna kuning pada peta sehingga dapat dikatakan bahwa daerah penelitian merupakan daerah dengan resiko bencana kegempaan sedang.

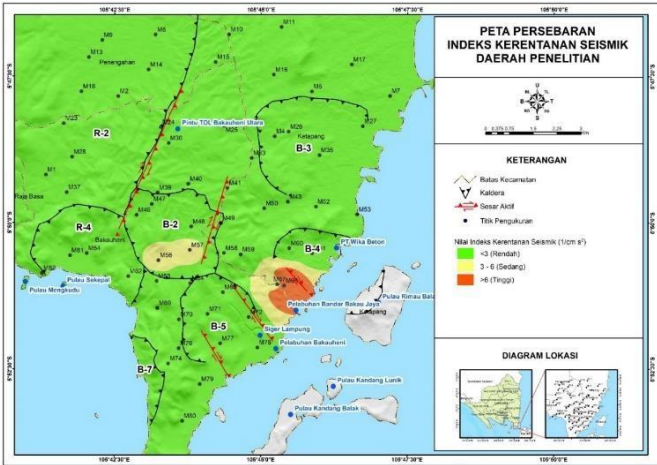


Gambar 7. Peta persebaran nilai amplifikasi

3.5. Analisis peta persebaran nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Nilai indeks kerentanan seismik digunakan untuk menggambarkan kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi pada daerah penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 8. Pada daerah penelitian indeks kerentanan seismik terbagi atas 3 kategori, yakni nilai Kg sebesar <3 1/cm s2 (rendah), 3 – 6 1/cm s2 (sedang) dan >6 1/cm s2 (tinggi).

Berdasarkan persebaran nilai Kg, daerah penelitian kaldera purba dengan simbol R-2, R-4, B-3, B-4, B-5 dan B-7 memiliki indeks kerentanan seismik rendah. Sedangkan daerah penelitian kaldera purba dengan simbol B-2 memiliki indeks kerentanan seismik rendah hingga sedang. Selain itu pada daerah penelitian terdapat area dengan indeks kerentanan seismik tinggi (> 6 l/cm s²) di bagian Barat Daya kaldera B-4.



Gambar 8. Peta persebaran indeks kerentanan seismik

4. Kesimpulan

- 1. Karakterisasi dan korelasi keberadaan sesar, dan kaldera purba Bakauheni, lapisan sedimen dapat dianalisis dengan parameter-parameter: Frekuensi Alamiah (f_0), nilai Vs30, Faktor Amplifikasi (A0), dan Indeks Kerentanan Seismik (Kg).
- 2. Hasil perhitungan HVSR menghasilkan nilai f_0 pada rentang <2,5 Hz (lapisan sangat tebal), 2,5 – 4 Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan 10 – 30 meter) dan 4 – 6,67 Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan 5 – 10 meter). Nilai f_0 tersebut menunjukkan adanya sedimen yang relatif tebal di kaldera.
- 3. Dari hasil inversi PSO HVSR, dapat di ekstraksi kecepatan gelombang geser (Vs) yang menghasilkan klasifikasi tanah sangat lunak (0 – 175 m/s), tanah lunak (175 – 350 m/s), tanah sedang dan batuan lunak (350 – 750 m/s), batuan sedang hingga keras (750 – 1500 m/s) dan batuan sangat keras (>1500 m/s).
- 4. Nilai amplifikasi yang terbagi atas dua kategori, yakni <3 kali dan 3-6 kali. Indeks kerentanan seismik terbagi atas 3 kategori, yakni nilai Kg sebesar <3 1/cm s² (rendah), 3 – 6 1/cm s² (sedang) dan >6 1/cm s² (tinggi).

- 5. Hasil HVSR menunjukkan bahwa ketebalan sedimen dan kerentatan seismik di Bakauheni tidak terkait langsung dengan sesar, tetapi terkait dengan keberadaan kaldera-kaldera tua. Sangat penting untuk merancang struktur bangunan yang adaptif terhadap aktivitas seismik dan keberadaan lapisan tebal di kaldera-kaldera tua tersebut.

Daftar Pustaka

[1] Mori, J., 2004. *Earthquake Prediction. Lecture notes on KAGI 21 Summer School*. Institute of Technology Bandung, Indonesia. August.

[2] Bronto, S., Asmoro, P., Hartono, G., dan Sulistiyono, S. 2012. Gunung Api Purba di Daerah Bakauheni – Pulau Sangiang, Selat Sunda, Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Sumber Daya Geologi*.

[3] Rohadi, S. dan Masturyono, 2015. *Lineasi Patahan Geologi Berdasarkan Distribusi hiposenter relokasi di Wilayah Jawa. Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, v.16 no.3

[4] Harjono, H., Diament, M., Dubois, J., Larue, M., and Zen, M. T. 1991. *Seismicity of the Sunda Strait: evidence for crustal extension and volcanological implications*. *Tectonics* 10, 17-30. doi:10.1029/90TC00285

[5] Deplus, C., Le Friant, A., Boudon, G., Komorowski, J-C., Villemant, B., Harford, C. 2001. *Submarine evidence for large-scale debris avalanches in the Lesser Antilles Arc*. *Earth Planet Sci. Lett.* 192, 145-157. doi:10.1016/S0012-821X(01)00444-7

[6] Hunt, J. E., Tappin, D.R., Watt, S. F. L., Susilohadi, S., Novellino, A., Ebmeier, S. K., Cassidy, M., Engwell, S. L., Grilli, S. T., Hanif, M., Priyanto, W. S., Clare, M. A., Abdurrahman, M., Udrek, U. (2021). *Submarine landslide megablocks show half of Anak Krakatau island failed on December 22nd, 2018*. *Nature Communications*. 12:2827. doi.org/10.1038/s41467-021-22610-5

[7] Mantovani, A., Valkaniotis, S., Rapti, D., Caputo, R., 2017. *Mapping the Palaeo-Piniada Valley, Central Greece, Based on Systematic Microtremor Analyses*. *Pure and Applied Geophysics* 1–17. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1731-7

[8] D’Amico, V., Picozzi, M., Baliva, F., Albarello, D., 2008. *Ambient Noise Measurements for Preliminary Site-Effects Characterization in the Urban Area of Florence, Italy*. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98, 1373–1388. https://doi.org/10.1785/0120070231

[9] Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Gallicchio, S., Tropeano, M., Lizza, C., 2004. *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) Measurements in the Area Damaged by the 2002 Molise, Italy, Earthquake*. *Earthquake Spectra* 20, 81–93. https://doi.org/10.1193/1.1766306

- [10] Scherbaum, F., Hinzen, K. G., Ohrnberger, M., 2003. *Determination of shallow shear wave velocity profiles in the cologne, Germany area using ambient vibrations*, *Geophys. J. Int.*, 152, 597-612.
- [11] Gallipoli, M.R., Stabile, T.A., Massolino, G., Chiauzzi, L., Bignardi, S., Rebez, A., Mucciarelli, M., 2018. *Ambient vibration tests on a building before and after the 2012 emilia (italy) earthquake and after seismic retrofitting*. 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE) June 2018, Thessaloniki, Greece.
- [12] Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R., 2001. *A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique*. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 42 255–266.
- [13] Akkaya, İ., 2015. *The application of HVSR microtremor survey method in Yüksekova (Hakkari) region, Eastern Turkey*. *Journal of African Earth Sciences* 109, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.018>
- [14] Akkaya, İ., Özvan, A., 2019. *Site characterization in the Van settlement (Eastern Turkey) using surface waves and HVSR microtremor methods*. *Journal of Applied Geophysics* 160, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.11.009>
- [15] Harutoonian, P., Leo, C.J., Tokeshi, K., Doanh, T., Castellaro, S., Zou, J.J., Liyanapathirana, D.S., Wong, H., 2013. *Investigation of dynamically compacted ground by HVSR-based approach*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 46, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.12.004>
- [16] Khalili, M., Mirzakurdeh, A.V., 2019. *Fault detection using microtremor data (HVSR-based approach) and electrical resistivity survey*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.003>
- [17] Maresca, R., Nardone, L., Gizzi, F.T., Potenza, M.R., 2018. *Ambient noise HVSR measurements in the Avellino historical centre and surrounding area (southern Italy). Correlation with surface geology and damage caused by the 1980 Irpinia-Basilicata earthquake*. *Measurement* 130, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.015>
- [18] Setiawan, B., Jaksa, M., Griffith, M., Love, D., 2018. *Seismic site classification based on constrained modeling of measured HVSR curve in regolith sites*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 110, 244–261. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.08.006>
- [19] Abu Zeid, N., Corradini, E., Bignardi, S., Morandi, N., Nizzo, V., Santarato, G., 2016. *Unusual Geophysical Techniques in Archaeology - HVSR and Induced Polarization, A Case History*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602027>
- [20] Abu Zeid, N., Bignardi, S., Santarato, G., Peresani, M., 2017. *Exploring the paleolithic cave of Fumane (Italy): Geophysical methods as planning tool for archaeology*. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 2017 5125–5129. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17729320.1>
- [21] Abu Zeid, Nasser, Corradini, E., Bignardi, S., Nizzo, V., Santarato, G., 2017. *The Passive Seismic Technique ‘HVSR’ as a Reconnaissance Tool for Mapping Paleo-soils: The Case of the Pilastrì Archaeological Site, Northern Italy: HVSR: a promising exploration tool for Archaeology*. *Archaeological Prospection* 24, 245–258. <https://doi.org/10.1002/arp.1568>
- [22] Bignardi, S., Zeid, N.A., Corradini, E., Santarato, G., 2017. *The HVSR technique from array data, speeding up mapping of paleo-surfaces and buried remains: The case of the Bronze-Age site of Pilastrì (Italy)*, in: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017*. Presented at the SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, Society of Exploration Geophysicists, Houston, Texas, pp. 5119–5124. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17746745.1>
- [23] Wilken, D., Wunderlich, T., Majchczack, B., Andersen, J., Rabbel, W., 2015. *Rayleigh-wave Resonance Analysis: a Methodological Test on a Viking Age Pit House: Seismic Resonance Analysis on a Pit House*. *Archaeological Prospection* 22, 187–206. <https://doi.org/10.1002/arp.1508>
- [24] Zaenudin, A., Karyanto, Kurniasih, A. Wibowo, R.C. 2021. [Analisis Struktur Patahan Daerah Suoh Menggunakan Metode Gaya Berat dan Penentuan Kerapatan Patahan](https://doi.org/10.1190/segam2017-17746745.1), *POSITRON*, Vol. 11, No. 2 Hal. 95-103, <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpositron/article/view/48461/pdf>.
- [25] Zaenudin, A., Yogi, I.B.S., 2021. *Preliminary study of HVSR forward modeling: parameters properties and non-uniqueness of subsurface models*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1816 012063, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1816/1/012063/pdf>
- [26] Zaenudin, A., Darmawan1, I.G.B., Laimeheriwa, G., 2020. *2D Gravity Qualitative Modeling to Identify Bedrock and Volcanic Rocks in South Lampung Region*, *Al-Biruni*, Volume 9. Issue 1. 161-175, <http://ejournal.radenintan.ac.id/index.php/al-biruni/article/view/5859/pdf>
- [27] Zaenudin, A., Risman, R., Darmawan, I.G.B., Yogi, I.B.S., 2020. *Analysis of gravity anomaly for groundwater basin in Bandar Lampung City based on 2D gravity modelling*, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1080 012043, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1572/1/012006>
- [28] Rananda, E., Suharno, Zaenudin, A. 2020. *Site Class dan Upaya Mitigasi Dampak Kegempaan Daerah Bandar*, *Jurnal Penelitian Geografi*, Vol 8, No 1, 57-62., <http://jurnal.fkip.unila.ac.id/index.php/JPG/article/view/21342>
- [29] Zaenudin, A., Yulistina, S., 2018. *Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis First Horizontal Derivative (FHD), Second Vertical Derivative (SVD), Dan 2,5D Forward Modeling Di Daerah Manokwari Papua Barat*, *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, Vol 4, No 2, 105-117,

- <http://jge.eng.unila.ac.id/index.php/geoph/article/view/15/pdf>
- [31] Aki, K., Richards, P.G., 2002. *Quantitative Seismology*, second ed. University Science Books, Sausalito, CA
 - [32] Lunedei, E., Albarello, D., 2010. *Theoretical HVSr curves from full wavefield modelling of ambient vibrations in a weakly dissipative layered Earth*. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04560.x>
 - [33] Lunedei, E., Malischewsky, P., 2015. *A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations*, in: Ansal, A. (Ed.), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 371–394. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_15
 - [34] Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M.A., Rodríguez-Castellanos, A., 2011. *A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium: Theory for microtremor H/V spectral ratio*. *Geophysical Journal International* 186, 221–225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x>
 - [35] Tsai, N.C., Housner, G.W., 1970. *Calculation of surface motions of a layered half-space*. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60 1625–1651.
 - [36] Herak, M., 2008. ModelHVSr—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computers & Geosciences* 34, 1514–1526. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.009>
 - [37] Bignardi, S., Zeid, N.A., Corradini, E., Santarato, G., 2017. *The HVSr technique from array data, speeding up mapping of paleo-surfaces and buried remains: The case of the Bronze-Age site of Pilastri (Italy)*, in: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Presented at the SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, Society of Exploration Geophysicists, Houston, Texas, pp. 5119–5124. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17746745.1>
 - [38] García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F.J., Luzón, F., Pertón, M., 2016. *A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption*. *Computers & Geosciences* 97, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.016>