

Analisis Kerentanan Seismik dan Model Vs30 Berdasarkan Survei Mikrotremor HVSR dan SPAC (Studi Kasus: Kota Banda Aceh)

Seismic Vulnerability and Vs30 Model Analysis based on HVSR and SPAC Microtremor Survey (Case Study: Banda Aceh City)

Yusran¹, Andrean V H Simanjuntak^{2,3}, Muksin Umar³, dan Rahmati¹

¹Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh

²Stasiun Geofisika Aceh Besar, BMKG, Banda Aceh

³Tsunami Disaster and Mitigation Research Center of Syiah Kuala University, Banda Aceh

e-mail: yusran@ar-raniry.ac.id

naskah diterima 21 April 2020, selesai direvisi 2 Agustus 2021, dan disetujui 5 Agustus 2021

ABSTRAK

Banda Aceh dikategorikan sebagai kota besar yang rentan akan bahaya gempa bumi karena terletak pada sistem tektonik aktif yaitu Patahan Sumatra yang tersegmentasi yaitu Seulimeum di bagian timur dan Aceh di bagian barat. Aktivitas kedua segmen yang membangkitkan kegempaan lokal dapat memberikan potensi kerusakan besar pada masa mendatang. Potensi tersebut dapat dipelajari dengan analisis kerentanan seismik berdasarkan parameter mikrotremor seperti nilai frekuensi (f_0), amplifikasi (A), kerentanan seismik (Kg) dan kecepatan geser (Vs30). Dalam studi ini, kami melakukan survei mikrotremor *Horizontal Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dan *SPatial AutoCorrelation* (SPAC) pada daerah Peukan Bada yang menjadi bagian Kota Banda Aceh. Sebanyak 19 titik HVSR dianalisis dengan perbandingan spektrum H/V dan 3 titik SPAC dianalisis dengan F-K analisis pada kurva dispersi gelombang *rayleigh* untuk mendapatkan nilai kecepatan geser pada kedalaman 30m (Vs 30). Hasil parameter yang diperoleh yaitu frekuensi 2.5 – 4 Hz dan periode 0 – 0.5 detik berasal dari formasi sedimen aluvial muda (Qh) yang terbentuk sejak Kenozoik. Amplifikasi tertinggi berada bagian barat dengan nilai > 1, sedangkan bagian barat nilai kecil < 1 karena dekat dengan formasi batuan gamping tersier (Murl). Sekitar 63% wilayah studi area sangat rentan terhadap gempabumi karena nilai indeks kerentanan yang tinggi dari formasi batuan lunak atau tidak kompak. Selain itu, Vs30 yang diperoleh berkisar pada nilai 200-250 m/s yang berasal dari formasi peralihan batuan lunak-keras. Kondisi tersebut membuat indeks kerentanan seismik bernilai cukup tinggi dan gelombang gempa bumi berpotensi dikuatkan karena melewati formasi batuan-batuan lunak. Hasil yang diperoleh dari studi ini diharapkan bisa menjadi pendukung mitigasi dan memahami kondisi geologi Banda Aceh dari segi kerentanan seismik.

Kata kunci: mikrotremor, kerentanan seismik, Banda Aceh

ABSTRACT

Banda Aceh is categorized as a city that is prone to earthquake as it is located in an active tectonic system, named the Sumatran Fault, stretched from Seulimeum in the east and Aceh in the west. The activities of the two segments with its local seismicity can potentially caused major damage in the future. This potential can be studied by seismic susceptibility analysis based on microtremor parameters such as frequency (f_0), amplification (A), seismic susceptibility (Kg) and shear velocity (Vs30). In this study, we conducted a HVSR and SPAC microtremor survey in the Peukan Bada at the outskirts of Banda Aceh. A total of 19 HVSR points were analyzed with a comparison of the H/V spectrum and 3 SPAC points analyzed by F-K analysis on the Rayleigh wave dispersion curve to obtain the value of shear velocity at a depth of 30m (Vs 30). The parameter results obtained are a frequency of 2.5 - 4 Hz and a period of 0 - 0.5 seconds derived from the formation of young aluvial sediments (Qh) formed since Cenozoic. The highest amplification is in the western part with a value of > 1, whereas the western part has a small value <1 because it is close to the tertiary limestone (Murl) rock formation. About 63% of the study area is highly vulnerable to earthquakes due to the high

susceptibility index values of soft or non-compact rock formations. In addition, the value of $V_s 30$ obtained is in the range of 200-250 m / s which is derived from the intermediate soft-hard rock formation. These conditions make the seismic vulnerability index is recorded as high enough and earthquake waves have the potential to be amplified as they pass through soft rock formations. The results from this study are expected to be a supporting for mitigation measurement and for having greater understanding to the geological conditions of Banda Aceh in terms of seismic vulnerability.

Keywords: microtremor, seismic susceptibility, Banda Aceh

PENDAHULUAN

Banda Aceh termasuk kota dengan tingkat kerawanan gempa bumi yang tinggi berasal dari sistem patahan aktif. Potensi terbesar dari kedua patahan aktif, yaitu Seulimeum dan Aceh, dengan laju geser 2.2 - 2.5 cm/tahun (Ito drr., 2012; Omang drr., 2016). Segmen Aceh menjadi salah satu patahan yang diperhatikan karena pasif (*seismic gap*) tetapi berpotensi membangkitkan magnitudo ~7 (Sieh dan Natawidjaja, 2000; Ito drr., 2012; Pasari drr., 2021).

Sejarah gempa sekitar Banda Aceh seperti pada Tabel 1 dan Gambar 1 yaitu: Segmen Seulimeum (M 6.5) tahun 1964 (Sieh dan Natawidjaja, 2000), Segmen Aceh (M 6.0) tahun 1997 (Sieh dan Natawidjaja, 2000; Hurukawa drr., 2014). Selain itu, gempa juga terjadi di luar Segmen Aceh dan Seulimeum, pada tahun 2013 di Bener Meriah (M 6,2) dan 2016 di Pidie Jaya (M 6.5) kerugian parah yaitu banyaknya korban, harta

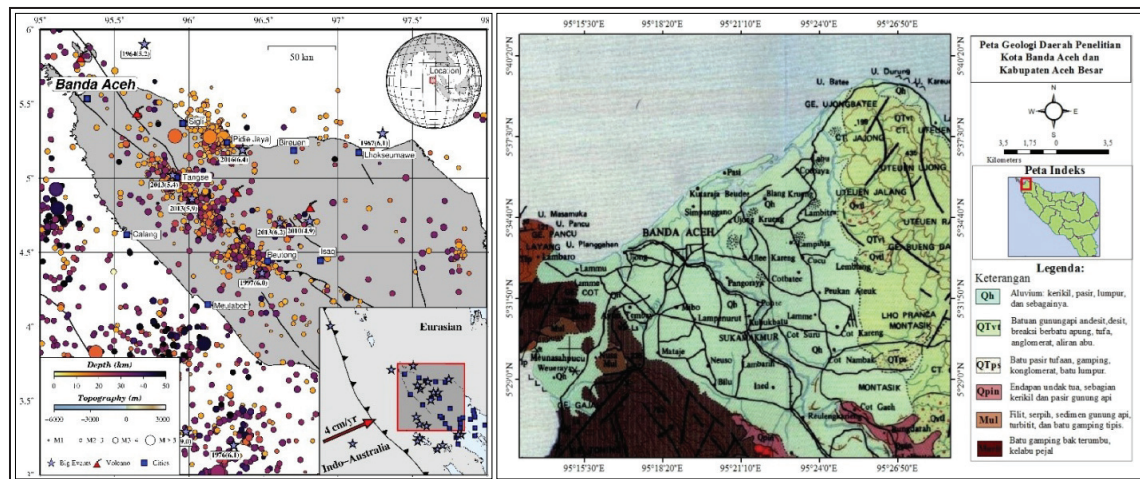
dan jiwa (Simanjuntak dan Olymphina, 2017; Muksin drr., 2019; Simanjuntak drr., 2019; Qadariah drr., 2018).

Selain itu, Banda Aceh termasuk pada zona dengan bahaya dan kerentanan seismik yang tinggi dengan percepatan gempa bumi sekitar 0.3 - 0.4g (periode ulang 475 tahun) dan 0.5 - 0.6g (periode ulang 2475 tahun). Studi mikrotremor menunjukkan kerentanan semakin tinggi pada sedimen aluvial dengan densitas yang rendah pada daerah cekungan (Nakamura, drr., 2000).

Geologi Banda Aceh seperti pada Gambar 1 memiliki formasi aluvial tebal (Qh) yang berdiri di atas cekungan sehingga percepatan dan kerentanan dapat teramplifikasi 1.5 – 2.0 kali lebih besar (Irsyam drr., 2017; Simanjuntak drr., 2018; Asnawi drr., 2020; Irwandi drr., 2021). Selain itu, sedimen aluvial juga memiliki potensi likuifaksi karena faktor porositas dan permeabilitasnya terhadap fluida cukup tinggi.

Tabel 1. Data Gempa Signifikan di Aceh dan dirasakan di Kota Banda Aceh tahun 1964-2016 (BMKG, 2018).

No.	Tahun	Lokasi	Episenter		Bulan dan Magnitudo			
			Lat. (°)	Lon. (°)	Jan - Mar	Apr - Juni	Jul - Sep	Okt - Des
1.	1964	Lamteuba, Seulimeum	5,90	95,70		5,2		
2.	1967	Aceh Tengah	5,30	97,30		6,1		
3.	1976	Kotacane	3,20	96,30		6,1		
4.	1983	Aceh (Laut P Aceh)	5,72	94,72		6,6		
5.	1997	Beutong	4,36	96,49			6	
6.	2004	Aceh-Andaman	3,29	95,98				9
7.	2005	Simeulue	2,16	96,78		6,8		6,5
8.	2008	Simeulue	2,65	96,00	7,3			
9.	2010	Aceh tengah	4,71	96,81	4,9			
10.		Simeulue	2,33	97,02		7,6		
11.		Aceh Barat	3,61	95,84		7,2		
12.		Aceh-Andaman	7,68	91,99		7,5		
13.	2011	Singkil	2,81	97,85			6,7	
14.	2012	Wharton Basin	2,4	92,99		8,5		
15.		Subulussalam	2,81	97,71		6,6		
16.		Simeulue	2,51	95,90			6,4	
17.	2013	Pidie	4,86	96,02	5,9			
18.		Bener Meriah	4,70	96,61			6,2	
20.	2016	Meureudu, Pidie Jaya	5,19	96,36				6,4



Gambar 1. Sebaran gempa bumi signifikan provinsi Aceh tahun 1980 - 2016 yang dirasakan di kota Banda Aceh (kiri) dan kondisi geologi pada wilayah Banda Aceh dengan dominasi sedimen aluvial (Qh) (modifikasi barber dr., 2005) (kanan).

Kajian mitigasi bencana telah banyak dilakukan dalam rangka pengurangan resiko gempa bumi di Banda Aceh. Untuk mendukung studi tersebut, kami melakukan analisis mikrotremor dengan memanfaatkan perbandingan *ambient noise* komponen vertikal dan horizontal untuk menggambarkan stuktur bawah permukaan. Struktur tersebut dapat diketahui dengan mencari parameter dinamik, seperti frekuensi (f_0), amplifikasi (A), indeks kerentanan seismik (K_g) dan Vs 30 meter. Kami melakukan kajian lebih spesifik pada satu wilayah yaitu Peukan Bada. Pengukuran mikrotremor dilakukan berdasarkan dua pertimbangan yaitu dekat dengan segmen aktif Aceh dan padat penduduk. Hasil analisis digunakan untuk mencari indeks kerentanan seismik (K_g) sebagai kajian mitigasi bencana. Dengan indeks kerentanan seismik, perencanaan dan pembangunan infrastruktur dapat dilakukan sesuai dengan kondisi tanah mitigasi bencana.

METODE PENELITIAN

Sebanyak 19 lokasi dilakukan pengukuran dengan seismometer *short period* dan direkam dengan *sampling rate* 100 sps (*sample per second*) dalam 45-60 menit dalam keadaan *noise* yang kecil (Gambar 2).

Pengukuran SPAC dilakukan dengan seismik *array* konfigurasi *triangle geophone* 5 Hz. yang

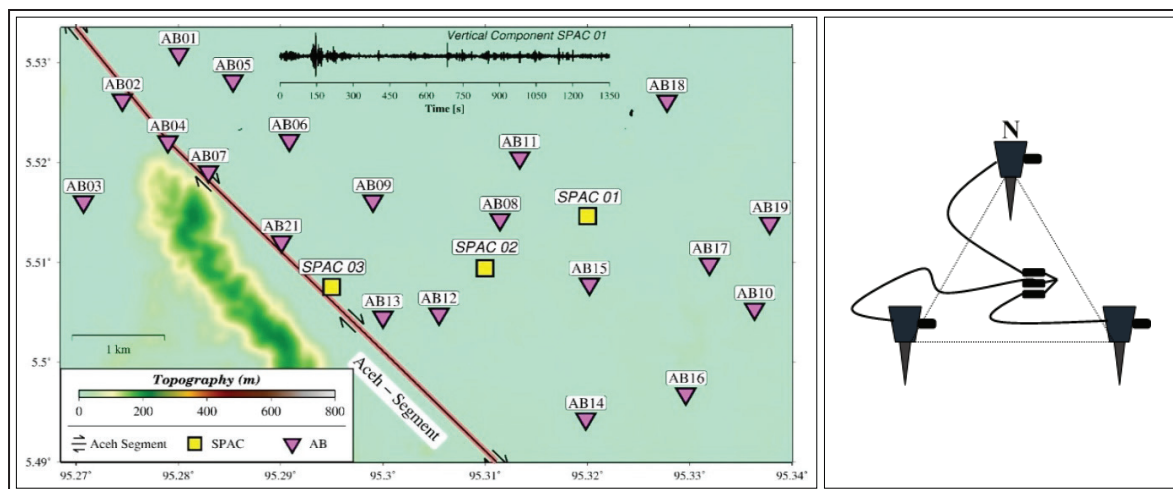
disimpang dalam system data logger *DSS Cube*. Sinyal observasi SPAC dianalisis dengan inversi pada kurva dispersi *bessel* antara fase kecepatan dan frekuensi seismik.

Analisis HVSr dilakukan dengan perbandingan spektrum *fourier* gelombang *rayleigh* ($\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$) pada komponen H/V. Puncak spektrum H/V akan didapatkan dari polaritas gelombang *rayleigh* (Konno dan Ohmachi, 1998; Bard dr., 2004; Nakamura, 2000).

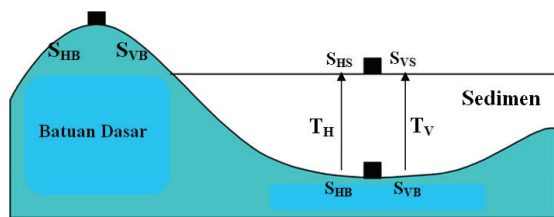
Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr). Metode H/V *ambient noise* memakai perbandingan rasio spektrum *fourier* pada komponen horizontal dan vertikal (Nakamura, 1997; Okada, 2003; Asnawi dr., 2020). Nakamura (1997) memisahkan efek sumber untuk menormalkan spektrum horizontal dengan vertikal. Hasil pemisahan menunjukkan batuan keras memiliki amplifikasi H/V ~ 1 sementara pada batuan lunak > 1 .

Berdasarkan hal tersebut, asumsi fungsi transfer HVSr mikroseismik dapat dibuat seperti pada Gambar 3. Perbandingan titik pengukuran pada dua struktur berbeda sebagai contoh pada sedimen lunak dan batuan keras seharusnya bisa dilakukan untuk melihat perbedaan efek lokal dengan menerapkan konsep HVSr dan SPAC.

Site Effect (T_{SITE}) permukaan sedimen dapat dihitung dengan membandingkan amplifikasi



Gambar 2. Lokasi HVSR dan SPAC dengan contoh rekaman gelombang komponen vertikal titik SPAC 01. 21 titik HVSR (segitiga ungu) dan 3 titik SPAC (kotak kuning) dengan konfigurasi triangle array diukur dalam rentang waktu 45 menit.



Gambar 3. Model cekungan yang berisi material sedimen halus (Modifikasi Nakamura, 2000).

dari gerakan horizontal dan vertikal seperti pada persamaan (1), yaitu:

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \dots\dots\dots (1)$$

Amplifikasi horizontal dan vertikal ($T_{H,V}$) pada persamaan (2) yaitu perbandingan spektrum horizontal di permukaan tanah (S_{HS}) dan di dasar tanah (S_{HB}):

$$T_{H,V} = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \dots\dots\dots (2)$$

Nakamura (1997) menunjukkan rekaman batuan keras memiliki nilai maksimum rasio H/V ~1, sehingga:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \text{ atau } \frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

Apabila persamaan (2) dan (3) disubstitusikan kedalam persamaan (1), maka di peroleh:

$$T_{SITE} = \frac{S_{HS}}{S_{VB}} = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \times \frac{S_{VB}}{S_{VS}} \dots\dots\dots (4)$$

Dengan menginversi persamaan (4) maka akan menghasilkan nilai HVSR pada persamaan (5), yaitu:

$$T_{SITE} = \text{HVSR} = \frac{\sqrt{(S_{utara-selatan})^2 + (S_{barat-timur})^2}}{S_{VS}} \dots\dots (5)$$

Dalam studi ini, distribusi lognormal dipakai untuk mendeskripsikan H/V dan f_0 (Cox drr., 2020). Distribusi lognormal memberikan konsistensi pada perhitungan amplitudo. Selain itu, metode *frequency-domain window-rejection* dilakukan untuk mengurangi variansi yang besar pada kualitas data. Perhitungan variabilitas azimuth juga diterapkan untuk melihat distribusi nilai H/V pada sinyal *rayleigh* dari sudut tertentu (Cheng drr., 2020).

Autokorelasi spasial (SPAC) umumnya digunakan untuk memodelkan struktur kecepatan gelombang geser (V_s) dekat permukaan (Aki, 1957). Metode SPAC menerapkan konfigurasi *array geophone* tertentu. Secara umum, metode SPAC dirumuskan sebagai berikut pada persamaan (6) (Okada, 2003),

$$\rho(x, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{COH}(x, f, \theta) d\theta = J_0 \left(\frac{2\pi f}{c(f)} \right) x \dots\dots (6)$$

f (frekuensi), θ (*azimuth*), c (fase kecepatan seismik) dan J_0 (fungsi Bessel). Fase kecepatan diperoleh dari sinyal observasi yang sesuai dengan inversi dispersi Bessel. Sinyal observasi dibandingkan dengan inversi atas asumsi lapisan berdasarkan fase kecepatan seismik, yang dihitung secara inversi pada setiap interval kedalaman.

Nilai Vs dihitung dengan inversi pada interval kedalaman 10, 20, dan 30 m di bawah permukaan tanah (VS_{0-10} , VS_{0-20} , dan VS_{0-30}) (Cho, 2020). Setiap kedalaman terbagi atas beberapa interval rata-rata kecepatan (AVS) pada kedalaman D_1 dan D_2 seperti pada persamaan (7):

$$AVS_{D1-D2} = \frac{D1 - D2}{\Delta T_{D1-D2}} \dots\dots\dots (7)$$

Apabila $Vs(z)$ adalah kecepatan gelombang S, maka ΔT_{D1D2} adalah $\Delta T_{0-20} = \Delta T_{0-10} + \Delta T_{10-20}$ sehingga:

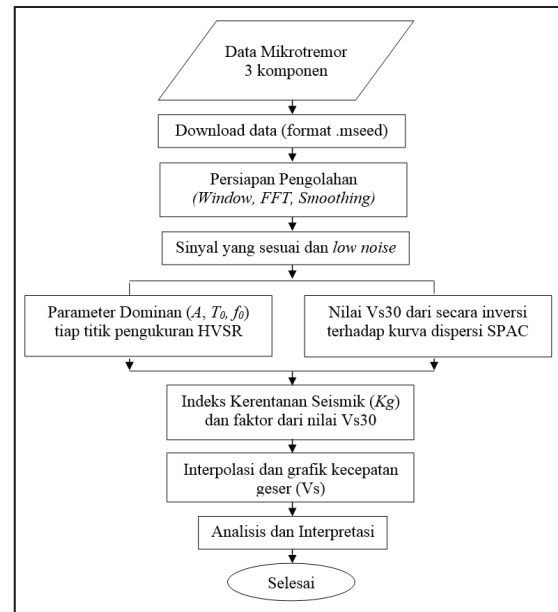
$$\frac{20}{AVS_{0-20}} = \frac{10}{AVS_{0-10}} + \frac{10}{AVS_{10-20}} + c \dots\dots\dots (8)$$

langkah yang sama untuk AVS_{20-30} akan didapatkan:

$$SVS_{20-30} = \frac{(AVS_{0-20} AVS_{0-30})}{3 AVS_{0-20} 2 VS_{0-30}} + c \dots\dots\dots (9)$$

Secara lengkap, pengukuran mikrotremor yang dilakukan baik HVSR dan SPAC dijelaskan pada diagram alir seperti pada Gambar 4.

Pengukuran dan pengolahan terhadap data rekaman seismik dilakukan dengan persiapan data dengan windowing, FFT dan smoothing. Lalu, sinyal yang sesuai dan terpilih dianalisis untuk mendapatkan nilai parameter dominan dan Vs30 untuk dilakukan interpolasi, Analisis dan interpretasi dari nilai yang diperoleh menggambarkan kondisi dan tingkat kerentanan pada daerah studi kajian.



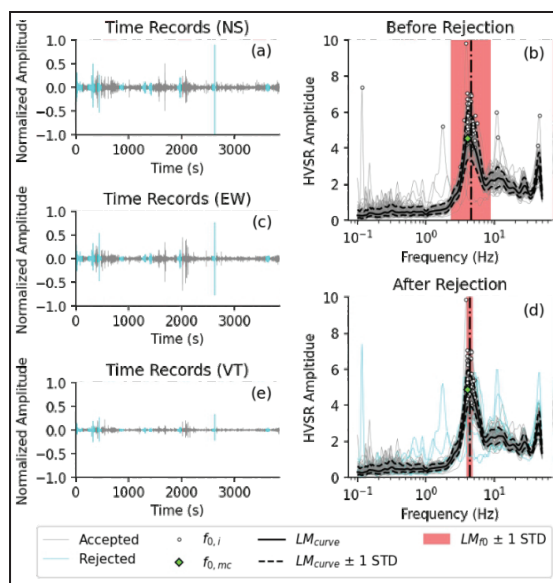
Gambar 4. Diagram alir pengukuran dan penelitian mikrotremor SPAC dan HVSR pada daerah kajian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

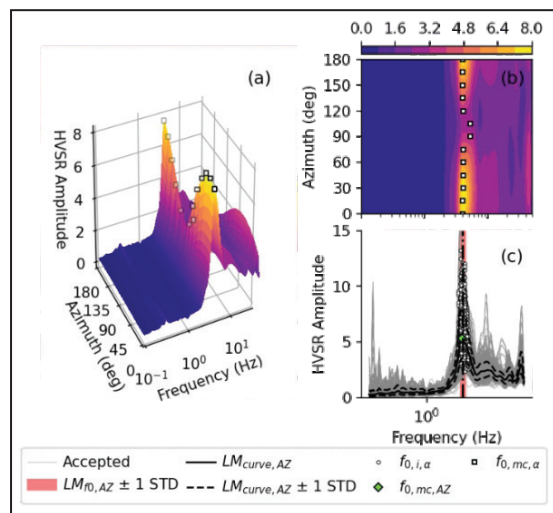
Pada studi ini, gelombang *transient* diperoleh dari *anti-triggering* perbandingan *Short Term Average* (STA) dan *Long Term Average* (LTA) pada 0 - 30s dengan *window* 60s dan *cosine taper* $\pm 10\%$ seperti pada Gambar 5 dan 6.

Koefisien *smoothing* Konno-Ohmachi (1998) sebesar 40 diberikan untuk memperhalus data pada frekuensi 0.1 – 50 Hz. Teknik *squared-average* dipakai untuk nilai H/V pada distribusi lognormal frekuensi-amplitudo seperti pada Gambar 4. Titik AB13 diukur struktur batuan kompak *gamping* (Murl) sehingga memiliki frekuensi cukup tinggi ~ 4.8 Hz. Selain itu, gelombang diukur sangat baik karena masuk dalam *windowing* yang menghasilkan kurva normal dengan deviasi rendah dan *low rejected*.

Pada Gambar 5, titik AB13 memiliki variabilitas azimuth $0^\circ - 180^\circ$ dengan deviasi yang rendah pada puncak H/V 4.8 – 5. Potensi amplifikasi tertinggi datang dari arah timur – selatan pada sudut azimuth $90^\circ - 120^\circ$ yang diduga memiliki struktur sedimen aluvium muda (Qh). Selain amplifikasi, nilai puncak frekuensi juga berada pada sudut azimuth yang sama pada rentang 4 – 5 Hz.



Gambar 5. Hasil analisis HVSR pada komponen NS (a) EW (c) VT (e), total waveform rejection (b) dan hasil distribusi normal terbaik setelah rejection (d) pada titik AB13 dengan kurva distribusi normal menghasilkan frekuensi (f_0) 4.8213 Hz.



Gambar 6. Hasil analisis HVSR terhadap azimuthal direction dengan nilai rata-rata frekuensi ambient seismic dominan ~ 4.8 Hz dengan dua puncak amplitudo pada arah $0^\circ - 80^\circ$ dan $120^\circ - 180^\circ$ pada rentang domain fourier transform 0.1 – 100 Hz.

Amplifikasi memberikan efek pembesaran gelombang permukaan yang sangat berbahaya karena efek merusak yang lebih tinggi. Amplifikasi biasanya ditemukan pada sedimen lunak aluvium yang berada pada struktur cekungan.

Analisis SPAC dilakukan pada domain frekuensi menggunakan transformasi fourier dengan

bandwidth 0.3 Hz yang tersegmentasi menjadi 10 durasi per 10.24s untuk mengurangi kesalahan windowing.

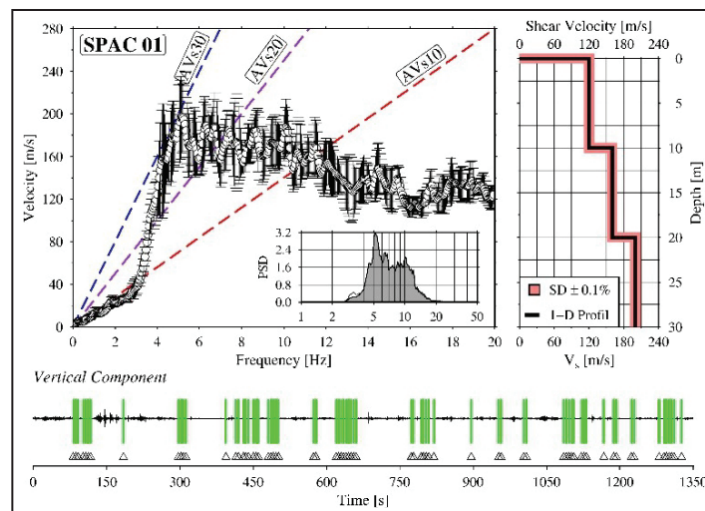
Analisis kurva dispersi pada Gambar 6 adalah lebih dari 5 Hz, karena sensitivitas *geophone* ~ 5 Hz. Dispersi terjadi apabila gelombang melewati lapisan tanah dan batuan bawah permukaan yang memiliki densitas berbeda dan akan menghasilkan rata-rata kecepatan yang berbeda.

Pada Gambar 7, kurva dispersi pada windowing yang terpilih (hijau) merupakan *selected window* karena memiliki deviasi yang minimum untuk memprofilkan model Vs 1-Dimensi pada analisis kurva dispersi. Kurva dispersi dihitung berdasarkan *power spectral density* > 5 Hz (puncak tertinggi) sesuai dengan sensitivitas *array* pada *geophone* dan juga kondisi batuan sekitar.

Profil yang didapat yaitu hubungan numerik kecepatan 1-dimensi pada kedalaman 30m (garis biru) adalah 200 m/s pada frekuensi 5.5 Hz, pada kedalaman 20m (garis ungu) adalah 170m/s pada frekuensi 7 Hz dan kedalaman 10 m (garis merah) 130 m/s pada frekuensi 10 Hz. Selain itu, deviasi model kecepatan 1-dimensi pada tiap kedalaman sangat bagus dengan *error* yang homogen pada $\pm 0.1\%$.

Berdasarkan hasil analisis HVSR dan SPAC, setiap titik pengukuran memberikan nilai parameter fisis yang berbeda secara spasial dan kedalaman. Nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh heterogenitas kondisi bawah permukaan sehingga secara interpolasi akan berbeda. Selanjutnya, interpolasi diterapkan untuk melihat perbedaan secara spasial setiap parameter fisis yang diperoleh seperti frekuensi, periode, amplifikasi, kerentanan seismik dan Vs30 seperti pada Gambar 7.

Interpolasi dilakukan dengan membatasi *coverage* area 2 kilometer sehingga terkonsentrasi pada wilayah studi area. Selain itu, grafik hasil analisis SPAC dibuat dengan *step* kedalaman per-10 meter. Pemodelan tersebut dapat menggambarkan wilayah yang memiliki kerentanan tanah yang tidak baik dan indek kerentanan seismik. Berdasarkan Gambar 7, frekuensi



Gambar 7. Contoh hasil kurva dispersi titik SPAC 01 untuk mendapatkan profil kecepatan seismik pada kedalaman 10, 20, dan 30 m (atas). Model kecepatan yang diperoleh memiliki *error* deviasi yang minimum pada $\pm 0.1\%$.

dominan (f_0) terendah dengan rentang 1.0 – 2.5 Hz terdapat pada kawasan titik AB 10, 11, 14, 15, 16, 17, dan 18. Kawasan ini didominasi oleh struktur tanah aluvial muda (Qh) yang terbentuk sejak Cenozoic (Asnawi drr., 2020).

Selain itu, struktur aluvium juga menjadi penyusun cekungan di bawah Banda Aceh. Tanah aluvium merupakan jenis tanah IV yang bisa mengamplifikasi amplitudo gelombang permukaan sehingga getaran dan intensitas yang dirasakan sangat kuat. Secara indeks seismisitas, nilai yang diberikan cukup tinggi $K_g > 2$ yang merupakan rasio perbandingan antara frekuensi dan amplitudo yang didapatkan dari semua titik pengukuran.

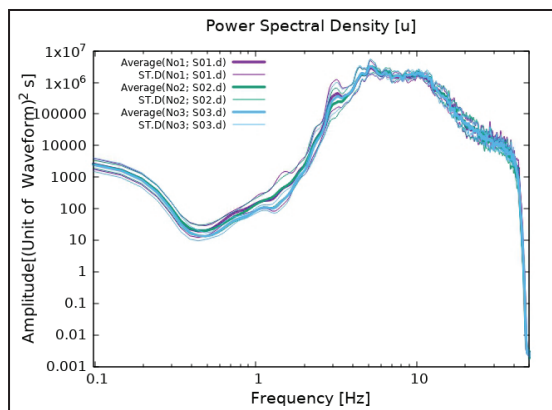
Pada bagian utara daerah studi, jenis batuan yaitu pada jenis II dengan rentang frekuensi 4.0 – 7.0 Hz pada titik AB 07, 09, 12, 13, dan 21 yang merupakan daerah dengan dominasi tanah dan batuan gamping dari periode tersier. Daerah ini cukup dekat pada patahan Aceh sehingga yang ditandai dengan perbedaan elevasi yang cukup tinggi dibandingkan tempat lain. Batuan gamping menjadi penyusun utama pada struktur patahan Aceh sehingga memiliki frekuensi yang tinggi.

Material padat dari batuan gamping memberikan faktor amplifikasi yang rendah sehingga sangat baik untuk infrastruktur, tetapi dengan lokasi yang cukup berdekatan dengan patahan aktif akan memberikan efek kerusakan yang

parah. Secara geodetik, Ito drr., (2012) meneliti bahwa patahan aktif Aceh memiliki potensi laju slip yang lebih tinggi dibandingkan dengan Seulimeum. Dengan periode kegempaan yang jarang terjadi, potensi gempa besar dan merusak bisa terjadi sepanjang patahan Aceh.

Perbedaan antara kedua lokasi disebabkan oleh salah satu berada di atas Cekungan Banda Aceh yang umumnya memiliki kerentanan tinggi karena frekuensi yang rendah disusun oleh materi tanah yang lunak. Sementara, lokasi disebelah barat dekat dengan patahan Aceh memiliki kondisi batuan yang cukup kompak. Sedangkan pada titik yang lain berdasarkan nilai frekuensi dominan, kawasan tersebut termasuk kedalam daerah yang didominasi oleh batu tersier dan batu aluvial.

Titik-titik AB 01, 02, 03, 04, 05, 06, 08, dan 19 memiliki rentang frekuensi 2.5 – 4.0 Hz. Batuan pada daerah ini tersusun atas peralihan aluvial dan gamping. Analisis kerentanan menunjukkan daerah ini memiliki kerentanan yang cukup homogen. Selain itu, periode dominan (T_0) pada Gambar 7 merupakan pembalikan dari nilai frekuensi dominan ($1/f_0$). Periode dominan berada pada range 0 – 1.2 detik. Periode dominan merupakan ukuran kerentanan suatu bangunan ketika dilewati oleh gelombang permukaan (*rayleigh* dan *love*).



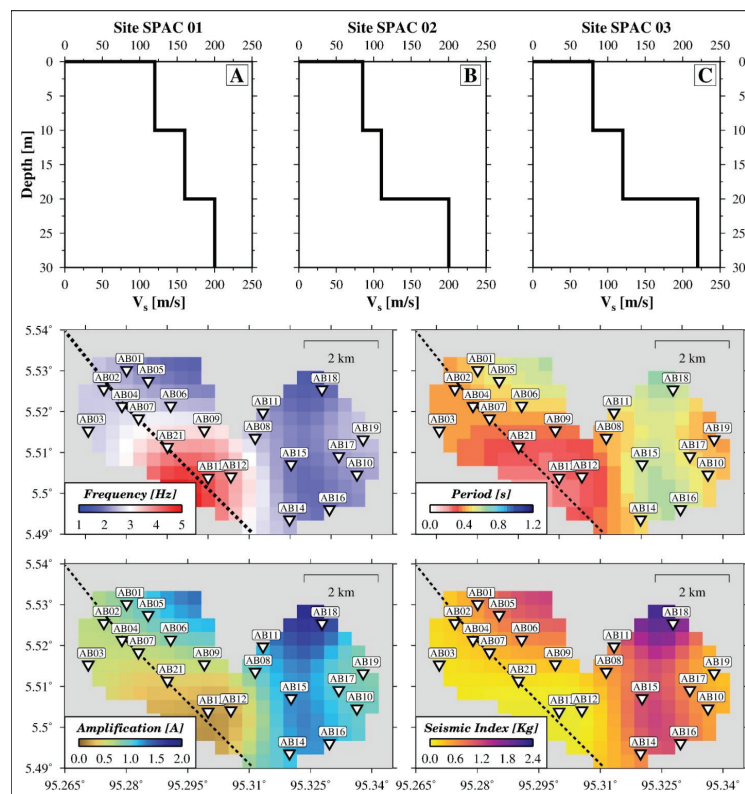
Gambar 8. Contoh profil *power spectral density* antara amplitudo dengan frekuensi pada 3 tiga *geophone* (S01, S02 dan S03) yang memiliki *range* sama pada domain frekuensi 0 – 50 Hz. Puncak frekuensi terdapat pada rentang 5 – 10 Hz pada rentang nilai amplitudo $10^5 - 10^7$.

Parameter V_{s30} sangat penting untuk pemodelan bahaya seismik yang bisa memberikan informasi penting pada analisis akselerasi dan intensitas gempa bumi pada permukaan (Irwandi

drr., 2021). Kawasan Banda Aceh termasuk dalam zona bahaya seismik tinggi dengan nilai *peak ground acceleration* pada *bed rock* sebesar 0.3 - 0.6 g (Irsyam drr., 2017). Faktor tersebut perlu diperhatikan dalam rencana pembangunan infrastruktur dengan memperhatikan kondisi bawah permukaan dan kerentanan seismik. Karakteristik berdasarkan nilai dan parameter dominan untuk jenis tanah dan batuan lebih lanjut setiap titik dapat dilihat pada Tabel 2.

Rentang 0 – 1.2 detik merupakan rentang untuk gempa-gempa lokal yang nilainya berada pada wilayah bagian timur daerah studi. Nilai ini menjadi pertimbangan dalam mendirikan bangunan yang bertingkat karena Darul Imarah dan Peukan Bada berlokasi sangat dekat dengan segmen Aceh yang menjadi sumber- gempa lokal.

Model kecepatan seismik 1-dimensi menunjukkan perbedaan nilai pada kedalaman 30 m. Titik SPAC pada *site point* I dan II memiliki nilai yang



Gambar 9. Peta dan grafik parameter dominan yang terdiri atas frekuensi dominan (f_0), periode dominan (T_0), amplifikasi (A) dan indeks seismisitas (K_g) pada titik mikrotremor dan V_{s30} pada titik SPAC. Pada gambar atas, parameter V_{s30} bervariasi pada tiap kedalaman 10, 20, dan 30 meter, dengan nilai V_{s30} pada titik SPAC 01 200 m/s, titik SPAC 02 200 m/s dan titik SPAC 03 245 m/s. Pada gambar bawah, profil parameter dominan ditunjukkan oleh setiap titik HVSR dengan frekuensi dan amplifikasi terbesar pada bagian timur yang dekat dengan sesar aktif Aceh yang tersusun oleh batuan gamping (Murl).

Tabel 2. Jenis Tanah berdasarkan Kanai dan Tanaka (1954) di Lokasi Pengukuran Peukan Bada dan Darul Imarah

Klasifikasi Batuan dan Tanah	Frekuensi range (Hz)	Site Point	Frekuensi HVSR	Geologi Tanah dan Batuan
Jenis II	4.0 – 7.0	07	3.7194	Batu Gamping Tersier (Murl)
		09	3.7885	
		12	4.1155	
		13	4.8213	
		21	3.7122	
Jenis III	2.5 – 4.0	01	2.7551	Batu Aluvial – Gamping (Qh – Murl)
		02	2.6221	
		03	2.6131	
		04	2.6216	
		05	2.8121	
		06	2.9544	
		08	3.2112	
		19	2.9766	
Jenis IV	1.0 – 2.5	10	2.2144	Tanah Aluvial (buff formation) dan sedimen lumpur (Qh)
		11	2.3126	
		14	2.2605	
		15	2.3371	
		16	2.1523	
		17	2.0135	
		18	1.9887	

sama yaitu 200 m/s sedangkan pada *site point* III memiliki 245 m/s. Hal ini dipengaruhi oleh struktur bawah permukaan yang cukup keras ketika lebih dekat pada patahan Aceh yang tersusun oleh batuan gamping.

Secara kurva dispersi, nilai *site point* 03 memiliki rata-rata kecepatan dan fase frekuensi yang lebih rapat karena nilai frekuensi yang tinggi. Selain itu, *site point* 01 dan 02 diukur pada struktur cekungan yang memiliki tanah aluvial. Sehingga, memiliki nilai Vs30 yang lebih rendah. Profil kecepatan 1-dimensi juga menunjukkan nilai penambahan pada kedalaman 10, 20 dan 30 meter. Hal tersebut menunjukkan densitas batuan yang lebih tinggi diikuti penambahan kedalaman. Selain itu, kondisi lapisan tanah aluvial tebal pada cekungan cekungan membuat factor amplifikasi gelombang permukaan menjadi dua kali lipat yang akan memberikan intensitas makroseismik yang lebih tinggi (Irsyam drr., 2017; Simanjuntak drr., 2018). Salah satu peristiwa penting yaitu gempa bumi 2004 (Mw 9.0) menimbulkan kerusakan dan kerugian parah, baik bangunan, infrastruktur dan korban jiwa di Banda Aceh yang berdiri di atas cekungan.

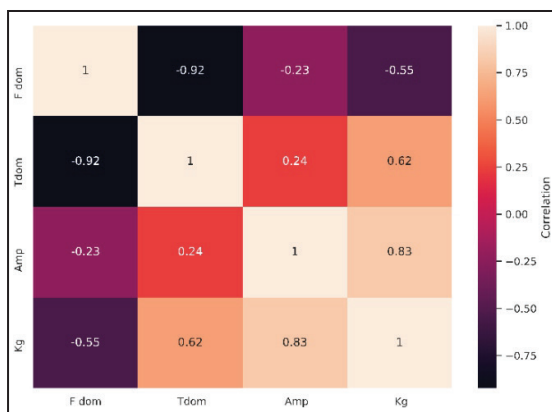
Berdasarkan Tabel 2, keadaan lapisan tanah pada kecamatan Peukan Bada dan Darul Ima-

rah, sebanyak 7 titik batuan lunak, 8 titik pada batuan aluvial dan gamping, dan 5 titik pada struktur keras batuan gamping. Variasi nilai sangat dipengaruhi oleh jenis dan stuktur bawah permukaan. Oleh karena itu, studi mikrotremor ini sangat penting dilakukan untuk melihat jenis batuan untuk kajian mitigasi bencana.

Hasil amplifikasi memiliki hubungan linier dengan kerentanan seismik yang tertinggi pada cekungan Banda Aceh. Hasil ini menjadi gambaran dan masukan yang baik dalam mendukung mitigasi di Banda Aceh. Indeks kerentanan yang tinggi pada wilayah cekungan merupakan hal biasa karena dominasi materi penyusun dari sedimen.

Pada Gambar 10, indeks korelasi setiap parameter dimodelkan dalam matriks *heatmap*. Matriks memberikan kondisi hubungan tiap parameter dominan. Indeks korelasi negatif menggambarkan dua variabel (atau lebih) yang berjalan dengan arah yang berlawanan, bertenangan, atau berkebalikan.

Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan atau pertambahan pada satu variabel, akan diikuti dengan penurunan pada variabel yang lain. Indeks korelasi negatif tertinggi terletak pada hubungan f_0 dan T_0 karena berhubungan terbalik. Sedangkan, indeks tertinggi ada pada hubungan



Gambar 10. Hubungan dan nilai korelasi setiap parameter dominan pada matrix heatmap.

amplifikasi (A) dan kerentanan seismik (Kg). Hubungan amplifikasi dan kerentanan sangat penting karena menggambarkan tingkat resiko yang dihasilkan. Keduanya merupakan parameter yang berhubungan linear karena saling berbanding lurus atau saling mempengaruhi untuk memperoleh nilai yang sesuai dengan kondisi geologi lokal.

KESIMPULAN

Hasil studi menggambarkan frekuensi 2.5 – 4 Hz dan periode dominan 0 – 0.5 detik berasal dari formasi sedimen aluvial muda (Qh) yang terbentuk sejak Cenozoic. Amplifikasi tertinggi berada bagian barat dengan nilai > 1 , sedangkan bagian barat nilai kecil < 1 karena dekat dengan formasi gamping tersier (Murl). Sekitar 63% wilayah studi rentan terhadap gempa bumi karena indeks kerentanan yang tinggi. Selain itu, Vs30 yang diperoleh berkisar pada nilai 200-250 m/s berasal dari formasi peralihan batuan lunak-keras. Kondisi tersebut membuat indeks kerentanan seismik bernilai cukup tinggi dan gelombang gempa bumi berpotensi dikuatkan. Hasil yang diperoleh dari studi ini diharapkan bisa menjadi kajian pendukung mitigasi dan memahami kondisi geologi Banda Aceh dari segi kerentanan seismik. Selain itu, studi lanjutan dengan penambahan titik SPAC bisa dilakukan untuk melengkapi model kecepatan seismik (Vs30) yang lebih sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada reviewer yang memberikan tanggapan positif untuk publikasi studi ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Andrean Simanjuntak, Muksin Umar, dan Suci sebagai rekan dalam analisis data dan pemodelan serta penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456.
- Asnawi, Y., Simanjuntak, A. V. H., Umar, M., Rizal, S., & Syukri, M., 2020. A Microtremor Survey to Identify Seismic Vulnerability Around Banda Aceh Using HVSR Analysis. Elkawnie., *Journal of Islamic Science and Technology*, 6(2), 342-358.
- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., & Rao, S., 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*, (December), 1–62.
- Barber, A. J., & Crow, M. J., 2005. Pre-tertiary stratigraphy. *Geological Society, London, Memoirs*, 31(1), 24-53.
- BMKG., 2018. Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak 1821-2017. *Pusat Gempa Bumi Dan Tsunami, Badan Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*, (11), 263.
- Cho, I., 2020. Two-sensor microtremor SPAC method: potential utility of imaginary spectrum components, *Geophysical Journal International*, 220(3), 1735-1747.
- Cheng, T., Cox, B. R., Vantassel, J. P., and Manuel, L., 2020. A statistical approach to account for azimuthal variability in single-station HVSR measurements, *Geophysical Journal International*, 223(2), 1040–1053. DOI: 10.1093/gji/ggaa342.

- Cox, B. R., Cheng, T., Vantassel, J. P., & Manuel, L., 2020. A statistical representation and frequency-domain window-rejection algorithm for single-station HVSR measurements, *Geophysical Journal International*, 221(3), 2170–2183. DOI: [10.1093/gji/ggaa119](https://doi.org/10.1093/gji/ggaa119).
- Hurukawa, N., Wulandari, B. R., & Kasahara, M., 2014. Earthquake history of the Sumatran fault, Indonesia, since 1892, derived from relocation of large earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(4), 1750–1762.
- Irsyam, M., Asrurifak, M., Mikail, R., Sabaruddin, A., & Faisal, L., 2017. *Pemutakhiran Peta, dan Gempa Indonesia*.
- Irwandi, I., Muksin, U., & Simanjuntak, A. V., 2021. Probabilistic seismic hazard map analysis for Aceh Tenggara district and microzonation for Kutacane city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 630, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Ito, T., Gunawan, E., Kimata, F., Tabei, T., Simons, M., Meilano, I., Sugiyanto, D., 2012. Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117(510), 16.
- Kanai, K. and T. Tanaka., 1954. Measurement of the microtremor, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.* 32, 199-209.
- Nakamura, Y., 1997. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. *World Congress on Railway Research*, 16.
- Nakamura, Y., 2000. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura S. *Spectrum*, 2656
- Muksin, U., Bauer, K., Muzli, M., Ryberg, T., Nurdin, I., Masturiyono, M., & Weber, M., 2019. AcehSeis project provides insights into the detailed seismicity distribution and relation to fault structures in Central Aceh, Northern Sumatra, *Journal of Asian Earth Sciences*, 171, 20-27.
- Omang, A., Cummins, P., Robinson, D., & Hidayati, S., 2016. Sensitivity analysis for probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) in the Aceh Fault Segment, Indonesia. *Geological Society, London, Special Publications*, 441(June), SP441.5.
- Okada, H., 2003. The Microtremor Survey Method, *Society of Exploration Geophysicists*.
- Pasari, S., Simanjuntak, A. V., Mehta, A., & Sharma, Y., 2021. A synoptic view of the natural time distribution and contemporary earthquake hazards in Sumatra, Indonesia, *Natural Hazards*, 1-13.
- Sieh, K., dan Natawidjaja, D., 2000. Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295–28326
- Simanjuntak, A. V., Muksin, U., & Rahmayani, F., 2018. Microtremor survey to investigate seismic vulnerability around the Seulimum Fault, Aceh Besar-Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 352, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.
- Simanjuntak, A. V., Muksin, U., & Setiawan, Y., 2019. Source Mechanism Analysis By Using Tensor Moment Inversion (Study Case: Pidie Jaya Earthquake in 2016 December 7th). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 273, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
- Simanjuntak, A. V., & Olymphina, O., 2017. Perbandingan Energi Gempa Bumi Utama dan Susulan (Studi Kasus: Gempa Subduksi Pulau Sumatera dan Jawa), *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 14(1), 19.
- Qadariah, Q., Simanjuntak, A. V., & Umar, M., 2018. Analysis of Focal Mechanisms Using Waveform Inversion; Case Study of Pidie Jaya Earthquake December 7, 2016, *Journal of Aceh Physics Society*, 7(3), 127-132.
- Konno K., Ohmachi T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components

of microtremor, *Bull. seism. Soc. Am.*, 88(1), 228–241.

SESAME., 2004. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements,

Processing, and Interpretation. *European Commission - Research General Directorate*, 62, European Commission - Research General Directorate.