

AMPLIFIKASI DAN ATENUASI GELOMBANG SEISMIK DI LAPISAN SEDIMEN PERMUKAAN

Urip Nurwijayanto Prabowo¹, Marjiyono²Sismanto³

¹Prodi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa, Yogyakarta,

²Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung

³Jurusan Fisika, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta

ABSTRACT

Soft sedimentary layer caused the amplification effect which amplified seismic wave. Besides of that, the soft sedimentary layer also have atenuation effect of seismic wave propagation. This research was conducted to evaluate the amplification and atenuation effect in soft sedimentary layer based on theoretical evaluation and 176 microtremor datas of Denpasar city which analyzed using HVSR method. The results of this research show that the value of amplification have a linear relation with the quality factor that have negative correlation with atenuation. The quality factors that calculated from HVSR curves are the quality factor of secondary seismic wave propagation.

PENDAHULUAN

Gempabumi merupakan bencana alam yang sangat potensial menimbulkan kerugian besar, belum dapat di prediksi secara akurat dan tidak dapat dicegah (Irsyam, dkk., 2010). Kerusakan yang ditimbulkan oleh gempabumi pada suatu daerah tidak hanya bergantung pada jarak daerah ke pusat gempa dan magnitudo gempa tetapi juga bergantung pada kondisi geologi permukaan (lapisan sedimen permukaan) daerah tersebut (Gurler, dkk., 2000).

Kondisi lapisan sedimen permukaan yang lunak menyebabkan daerah tersebut mengalami efek kerusakan yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi berbatuan keras (Gurler, dkk., 2000; Marjiyono dan Afnimar, 2011). Kondisi lapisan permukaan yang lunak dapat memperbesar efek amplifikasi yang merupakan perubahan guncangan gempabumi berupa perbesaran saat gelombang gempabumi dari bedrock (lapisan yang berada di bawah lapisan sedimen permukaan) ke lapisan sedimen permukaan (Aisyah, dkk., 2011). Amplifikasi akan terjadi saat nilai frekuensi gelombang gempa sama dengan frekuensi resonansi lapisan sedimen permukaan (Seht dan Wohlenberg, 1999). Nilai amplifikasi lapisan sedimen permukaan di suatu daerah dapat ditentukan berdasarkan pengukuran mikrotremor yang dianalisis menggunakan metode HVSR yang dikemukakan oleh Nakamura (1989).

Mikrotremor merupakan getaran konstan pada permukaan bumi yang sangat lemah dengan amplitudo antara 10⁻⁴–10⁻² mm. Sumber mikrotremor berasal dari aktivitas manusia seperti aktivitas mesin industri, lalu lintas dan fenomena alam seperti aliran air sungai, angin, variasi tekanan atmosfer, gelombang laut (Okada, 2003).

Menurut Sheriff dan Lloyd (1995), energi gelombang seismik yang melewati suatu medium akan mengalami penyerapan oleh medium karena dirubah menjadi panas yang ditimbulkan dari gesekan-gesekan partikel medium yang bergerak saat dilalui gelombang seismik. Proses penyerapan energi ini disebut atenuasi gelombang yang mengakibatkan menurunnya amplitudo gelombang dan nilainya bergantung pada jenis medium yang dinyatakan dalam konstanta atenuasi (Munadi, 2000). Pada medium yang lunak maka nilai konstanta atenuasi semakin besar sehingga amplitudo gelombang akan melemah. Hal ini berlawanan dengan efek pada permukaan yang terjadi pada lapisan permukaan dimana gelombang akan mengalami amplifikasi/perbesaran saat terjadi gempabumi.

Penelitian mengenai atenuasi gelombang seismik pada lapisan sedimen permukaan menggunakan metode HVSR telah dilakukan berdasarkan nilai faktor kualitas perambatan gelombang seismik (Q) pada lapisan sedimen.

Nilai Q merupakan kebalikan dari nilai konstanta atenuasi dan menyatakan perbandingan antara energi yang masuk ke dalam medium dengan energi yang diserap. Jika energi yang diserap oleh medium kecil maka nilai Q menjadi besar dan medium memiliki kemampuan yang baik dalam merambatkan gelombang, begitu pula sebaliknya (Sheriff dan Lloyd, 1995). Penelitian yang telah dilakukan antara lain menggunakan tinjauan pemodelan (Sungkono dan Santosa, 2011; Herak, 2008) maupun berdasarkan analisis HVSR (Farid, 2014). Namun hasil penelitian diatas menghasilkan kesimpulan yang berbeda antara lain dalam hubungan nilai amplifikasi dengan faktor perambatan gelombang seismik dan jenis gelombang seismik yang dinyatakan oleh nilai faktor kualitas.

Pada penelitian ini dilakukan kajian teoritis dan analisis data mikrotremor menggunakan metode HVSR untuk menentukan hubungan amplifikasi gelombang seismik (nilai amplifikasi kurva HVSR) dengan atenuasi gelombang seismik (nilai faktor kualitas perambatan gelombang seismik) di lapisan sedimen permukaan.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan cara menurunkan persamaan yang menyatakan hubungan antara amplifikasi dan faktor kualitas perambatan gelombang seismik di lapisan sedimen permukaan. Faktor kualitas merupakan kebalikan dari nilai atenuasi gelombang seismik. Selain itu hubungan antara amplifikasi dan faktor kualitas juga di tentukan berdasarkan perhitungan pada kurva HVSR hasil analisis data mikrotremor menggunakan metode HVSR. Data mikrotremor yang digunakan merupakan data yang digunakan pada penelitian Prabowo, dkk (2016) sebanyak 176 titik pengukuran. Data ini merupakan data pengukuran yang dilakukan oleh Tim Pusat Studi Geologi (PSG) Bandung pada bulan Mei sampai Juni dan Oktober sampai November tahun 2014

Metode HVSR merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamika lapisan sedimen permukaan di suatu daerah. Analisis pada metode ini dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$HVSR = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \tag{1}$$

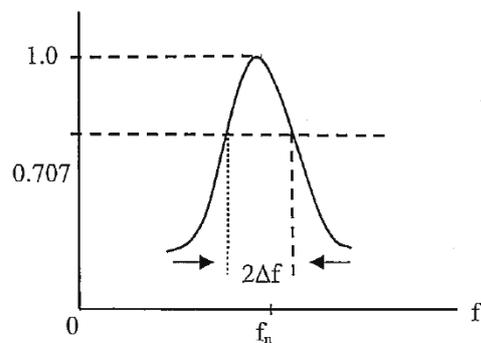
dengan S_{VS} adalah spektrum komponen vertikal di lapisan sedimen permukaan dan

S_{HS} adalah spektrum komponen horizontal dari data mikrotremor di atas lapisan sedimen. Hasil analisis menggunakan metode HVSR berupa kurva HVSR, dimana nilai puncak kurva HVSR merupakan nilai amplifikasi (A) dan nilai frekuensi (f_0) pada puncak kurva HVSR merupakan frekuensi dominan yang merupakan frekuensi resonansi lapisan sedimen permukaan (Nakamura, 1989).

Nilai faktor kualitas (Q) dapat ditentukan dari kurva HVSR berdasarkan hubungan antara faktor kualitas dan kurva resonansi (Farid, 2014). Hubungan antara faktor kualitas (Q) dan frekuensi dominan saat terjadi resonansi dinyatakan dalam persamaan dari Munadi (2000), yaitu

$$\frac{1}{Q} = \frac{2\Delta f}{f_0} \tag{2}$$

dengan $2\Delta f$ adalah lebar *bandwidth*/pita frekuensi yang merupakan lebar kurva resonansi pada amplitudo 0,707 dari nilai puncaknya (Gambar 1)



Gambar 1. Kurva resonansi dan hubungan antara pergeseran frekuensi dengan frekuensi resonansi (Munadi, 2000)

HUBUNGAN TEORITIS FAKTOR KUALITAS (Q) DENGAN AMPLIFIKASI

Amplifikasi terjadi jika frekuensi gelombang yang datang dari lapisan *bedrock* (f_{00}) memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi resonansi lapisan sedimen permukaan (f_{01}). Pada frekuensi resonansi, gelombang gempa bumi dari *bedrock* akan diperbesar A kali (A adalah nilai amplifikasi) di lapisan sedimen permukaan sehingga amplitudo gelombang gempa bumi di lapisan sedimen permukaan (a_s)

dapat dinyatakan sebagai

$$a_s = A a_B \quad (3)$$

dengan a_B adalah amplitudo gelombang gempabumi di lapisan *bedrock*. Menurut Nakamura (2000), nilai amplifikasi dinyatakan dengan persamaan

$$A = \frac{\rho_B V_{SB}}{\rho_S V_{SS}} \quad (4)$$

dengan ρ_B adalah massa jenis lapisan *bedrock*, ρ_S adalah massa jenis lapisan sedimen permukaan, V_{SB} adalah kecepatan gelombang sekunder di lapisan *bedrock*, V_{SS} adalah kecepatan gelombang sekunder di lapisan sedimen permukaan. Amplitudo gelombang gempabumi di lapisan permukaan berdasarkan persamaan 3 dan 4 dapat dinyatakan sebagai

$$a_s = \frac{\rho_B V_{SB}}{\rho_S V_{SS}} a_B \quad (5)$$

Amplitudo Gelombang Pada Lapisan Sedimen Permukaan Satu Lapis

Amplitudo gelombang yang melewati lapisan dengan tebal tertentu akan mengalami penyerapan energi oleh medium sehingga amplitudonya akan berkurang menjadi

$$a = a_0 \exp(-\alpha h) \quad (6)$$

dengan a adalah amplitudo gelombang setelah melewati medium, a_0 adalah amplitudo gelombang yang masuk kedalam medium, α adalah konstanta atenuasi gelombang, h adalah ketebalan lapisan medium yang dilewati gelombang (Sheriff dan Lloyd, 1995).

Hubungan antara faktor kualitas (Q) dengan konstanta atenuasi dinyatakan sebagai (Sheriff dan Lloyd, 1995).

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha V} \quad (7)$$

dengan demikian persamaan 6 dan 7 dapat dinyatakan dalam persamaan

$$a = a_0 \exp\left(-\frac{\pi f h}{Q V_s}\right) \quad (8)$$

Pada lapisan sedimen permukaan yang dianggap satu lapisan dan homogen, amplitudo gelombang mengalami perbesaran (persamaan 3) dan mengalami penyerapan energi oleh medium (persamaan 8) sehingga amplitudogelombang dapat dinyatakan dalam persamaan

$$a_{s1} = \left(\frac{\rho_0 V_{s0}}{\rho_1 V_{s1}}\right) a_B \exp\left(-\frac{\pi f_{00} h_0}{Q_0 V_{s0}}\right) \exp\left(-\frac{\pi f_{01} h_1}{Q_1 V_{s1}}\right) \quad (9)$$

dengan a_{s1} adalah amplitudo gelombang di permukaan sedimen pertama.

Amplitudo Gelombang Pada Lapisan Sedimen Permukaan Struktur Dua dan N Lapis

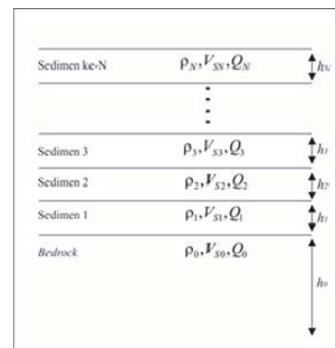
Jika terdapat 2 lapisan sedimen (Gambar 2), maka gelombang dari lapisan sedimen pertama akan mengalami perbesaran dilapisan sedimen kedua jika frekuensi gelombang lapisan

sedimen pertama (f_{01}) sama dengan frekuensi resonansi lapisan sedimen kedua (f_{02}). Amplitudo gelombang di lapisan sedimen kedua dinyatakan berdasarkan persamaan 5,8 dan 9 menjadi persamaan

$$a_{s2} = \left(\frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}}\right) a_{s1} \exp\left(-\frac{\pi f_{02} h_2}{Q_2 V_{s2}}\right) \quad (10)$$

$$a_{s2} = \left(\frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}} \frac{\rho_0 V_{s0}}{\rho_1 V_{s1}}\right) a_B \exp\left(-\frac{\pi f_{00} h_0}{Q_0 V_{s0}}\right) \exp\left(-\frac{\pi f_{01} h_1}{Q_1 V_{s1}}\right) \exp\left(-\frac{\pi f_{02} h_2}{Q_2 V_{s2}}\right)$$

dengan a_{s2} adalah amplitudo gelombang di permukaan sedimen kedua.



Gambar 2 Lapisan sedimen permukaan yang mengalami amplifikasi gelombang (ρ adalah massa jenis lapisan, V_s adalah kecepatan gelombang sekunder dan Q adalah faktor kualitas)

Pada lapisan sedimen sebanyak N lapisan, persamaan 10 dapat dinyatakan

$$a_{SN} = \sum_{i=0}^N \left(\frac{\rho_i V_{Si}}{\rho_{(i+1)} V_{S(i+1)}} a_B \right) \exp \left(- \frac{\pi f_{0i} h_i}{Q_i V_{Si}} \right) \quad (11)$$

Nilai amplifikasi gelombang di lapisan sedimen ke N berdasarkan persamaan 3 dan 11 dapat dinyatakan dalam

$$A = \sum_{i=0}^N \left(\frac{\rho_i V_{Si}}{\rho_{(i+1)} V_{S(i+1)}} \right) \exp \left(- \frac{\pi f_{0i} h_i}{Q_i V_{Si}} \right) \quad (12)$$

Persamaan 12 sesuai dengan pernyataan Herak (2008) bahwa nilai puncak kurva HVSR (amplifikasi) bergantung pada:

1. Kontras impedansi seismik (β) yang

$$\beta = \left(\frac{\rho_i V_{Si}}{\rho_{(i+1)} V_{S(i+1)}} \right)$$

dinyatakan sebagai

2. Waktu rambat gelombang pada tiap

$$\tau_i = \frac{h_i}{V_{Si}}$$

lapisan (τ_i) yang dinyatakan sebagai

3. Faktor kualitas perambatan gelombang (Q_i)

Pada persamaan 12 diketahui bahwa faktor kualitas perambatan gelombang pada kurva HVSR berkaitan dengan amplitudo gelombang yang mengalami amplifikasi di lapisan sedimen permukaan saat frekuensi gelombang sama dengan frekuensi resonansi. Pada lapisan sedimen tebal dengan faktor atenuasi tinggi maka energi gelombang gempa akan teratenuasi dengan kuat, namun bila terjadi efek resonansi akan menimbulkan amplifikasi yang besar sehingga efek resonansi akan lebih dominan daripada efek atenuasinya.

GEOLOGI REGIONAL KOTA DENPASAR

Pada peta geologi lembar Bali, Nusatenggara (Hadiwidjojo, dkk., 1998), Geologi kotamadya Denpasar bagian tengah dan utara merupakan formasi batuan gunungapi kelompok buyan-bratan dan batur berumur holosen dan terdiri atas materi tuff dan lahar. Pada bagian selatan merupakan formasi alluium berumur holosen yang tersusun atas material kerikil, pasir, lanau dan lempung dengan campuran endapan sungai danau dan pantai.

HASIL ANALISIS METODE HVSR DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis metode HVSR adalah nilai frekuensi dominan dan amplifikasi lapisan sedimen permukaan (Prabowo, dkk., 2016). Hasil ini kemudian digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai faktor kualitas perambatan seismik. Hasil perhitungan faktor kualitas selanjutnya dibandingkan dengan amplifikasi dengan cara membuat grafik *crossplot* antara faktor kualitas dengan amplifikasi (Gambar 3)



Gambar 3. Grafik *crossplot* nilai amplifikasi dan faktor kualitas

Grafik hubungan amplifikasi dan faktor kualitas menunjukkan bahwa nilai amplifikasi sebanding dengan nilai faktor kualitas. Hasil ini sesuai dengan persamaan 12 yang menyatakan bahwa nilai amplifikasi akan semakin besar dengan bertambahnya nilai faktor kualitas. Hubungan antara faktor kualitas dengan amplitudo kurva HVSR di daerah penelitian, berdasarkan grafik memiliki nilai $R^2 = 0,40$ dan dinyatakan dengan persamaan

$$Q = 0,1731A + 0,9621$$

(13)

Penelitian Sungkono dan Santosa (2011) menyimpulkan bahwa kurva HVSR tidak

dipengaruhi nilai Q_p (faktor kualitas dari perambatan gelombang primer) sedangkan nilai

Q_s (faktor kualitas dari perambatan gelombang sekunder) berpengaruh pada kurva

HVSR dengan semakin besar nilai Q_s maka nilai amplifikasi dari kurva HVSR semakin tinggi. Hal ini sejalan dengan pendapat Nakamura (2000), Petermans, dkk (2006) dan Marjiyono, dkk (2014) bahwa kurva HVSR dihasilkan dari efek pemantulan ganda (*multi reflection*) gelombang geser/gelombang sekunder di lapisan sedimen permukaan.

Penggunaan amplifikasi dalam analisis kerentanan seismik masih dipertanyakan keakuratannya oleh beberapa peneliti. Lachet dan Bard (1995), Hassani, dkk (2011) menyatakan bahwa amplifikasi pada kurva HVSR yang didapatkan dari pengukuran mikrotremor berbeda dengan amplifikasi yang diperoleh dari rekaman gempa bumi dan pemodelan menggunakan gelombang sekunder. Frekuensi dominan dan amplifikasi dari kurva HVSR dianggap bersumber dari gelombang Rayleigh namun tidak dibahas efek gelombang sekunder pada kurva HVSR. Nakamura (1989), Seekins, dkk (1996), Hata, dkk (2010), menyatakan bahwa amplifikasi kurva HVSR dari pengukuran mikrotremor sesuai dengan amplifikasi yang didapatkan dari rekaman gempa dan pemodelan menggunakan gelombang sekunder. Nakamura (2000), Konno dan Omachi (1998) berpendapat bahwa kurva HVSR dibentuk dari gelombang sekunder namun efek gelombang Rayleigh yang besar dapat mempengaruhi bentuk dari kurva HVSR sehingga merupakan *noisy* yang harus dihilangkan.

Berdasarkan hasil pada penelitian ini, maka faktor kualitas yang didapatkan dari kurva HVSR menggunakan persamaan 12 pada penelitian ini merupakan faktor kualitas perambatan gelombang sekunder. Semakin lunak suatu lapisan sedimen permukaan maka nilai amplifikasi akan semakin besar sehingga amplitudo gelombang yang menjalar akan semakin besar. Hal ini menyebabkan semakin lunak lapisan sedimen permukaan maka nilai faktor kualitas perambatan gelombangnya semakin besar.

KESIMPULAN

Amplifikasi memiliki hubungan yang linier dengan faktor perambatan gelombang seismik yang berarti berlawanan dengan atenuasi gelombang seismik. Hal ini dikarenakan jika resonansi terjadi pada lapisan sedimen saat dilewati gelombang gempa bumi maka efek amplifikasi akan lebih dominan dibandingkan dengan atenuasi oleh medium.

Nilai faktor kualitas yang didapatkan dari kurva HVSR berdasarkan metode grafis merupakan nilai faktor kualitas dari perambatan gelombang sekunder.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pusat Survey Geologi atas kesediaan data untuk penulis pakai pada penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, V., Suharna & S., A., 2011. *Ground Amplification Mapping Using HVSR Method (Horizontal To Vertical Spectral Ratio) In Patuk, Gunungkidul, Yogyakarta (Indonesia)*. Makassar, Proceedings JCM Makassar 2011, The 36th HAGI and 40th IAGI Annual Convention and Exhibition.
- Farid, M., 2014. Studi Mikroseismik untuk Mendeteksi Perubahan Garis Pantai dengan Indikator Indeks Kerentanan Seismik, Peak Ground Acceleration dan Ground Shear Strain di Provinsi Bengkulu. *Disertasi*, Issue Program Studi S3 Ilmu Fisika, FMIPA, UGM.
- Gurler, E., Nakamura, Y., Saita, J. & Tsutomu, 2000. *Local Site Effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement*. California, USA, Proceeding of 6th International Conference of Seismic Zonation.
- Hadiwidjojo, M., Samodra, H. & Amin, T., 1998. *Peta Geologi Lembar Bali, Nusa Tenggara*, s.l.: Direktorat Jendral Geologi dan Sumberdaya Mineral, Departemen Pertambangan dan Energi.
- Hassani, B., Zafarani, H., Farjoodi, J. & Ansari, A., 2011. Estimations of Site Amplification, Attenuation, and Source Spectra of S-Waves in the East-Central Iran. *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Issue 31, pp. 1397-1413.
- Hatta, Y. et al., 2010. Microtremor H/V Spectrum Ratio and Site Amplification Factor in the Seismic Observation Stations for 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake. *Bull. of Graduate School of Engineering Hiroshima University*, 1(59).
- Herak, M., 2008. Model HVSR – A Matlab Tool to Model Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Noise. *J. Computers and Geoscience*, Issue 34, pp. 1514-1526.
- Irsyam, M. et al., 2010. *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempabumi Indonesia*, Bandung: s.n.
- Konno, K. & Ohmachi, T., 1998. Ground Motion Characteristics Estimated From Spectral Ratio Between Horizontal To Vertical Components Of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1(88), pp. 228-241.
- Lachet, C. & Bard, P., 1995. *Theoretical Investigations on The Nakamura's Technique*. Missouri, Proceedings: Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St Louis.
- Marjiono, et al., 2014. Geologi Bawah Permukaan Dataran Klaten Berdasarkan Interpretasi Data Mikrotremor. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 1(15), pp. 3-9.
- Marjiyono & Afnimar, 2011. Mikrozonasi Bahaya Gempabumi di Wilayah Kota Bandung Berdasarkan Data Mikrotremor. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 21(1), pp. 41-49.
- Munadi, 2000. *Aspek Fisis Seismologi Eksplorasi*. Depok: Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia.
- Nakamura, Y., 1989. *A Method for Dynamic Characteristic Estimation of*. s.l., QR Railway Technical, 30, 1, 25-33.
- Nakamura, Y., 2000. *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications*. New Zealand, Proc XII World Conf. Earthquake Engineering.
- Okada, H., 2003. *The Microtremor Survey Method (Geophysical Monograph Series Number 12)*, Amerika: Society of Exploration Geophysicists.
- Petermans, T., Devleeschouwer, X., Pouriel, F. & Rosset, P., 2006. Mapping the Local Seismic Hazard in the Urban Area of Brussels, Belgium. *IAEG*.
- Prabowo, U., Marjiyono & Sismanto, 2016. Mapping the Fissure Potential Zones Based on Microtremor Measurement in Denpasar City, Bali. *IOP Conf Series: Earth and Environmental Science*, Volume 29.
- Seekins, L., W., L., M., L. & L., H.-P., 1996. Site Amplification at Five Locations in San Fransisco, California: A Comparison of S Waves, Coda and Microtremors. *Bull. of the Seismological Society of America*, 3(86), pp. 627-635.
- Seht, M. & Wohlenberg, J., 1999. Microtremor Used To Map Thickness Of Soil. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), pp. 250-259.
- Sheriff, R. & Lloyd, P., 1995. *Exploration Seismology*. Second Edition ed. London: Cambridge University Press.
- Sungkono & Santosa, B., 2011. Karakterisasi Kurva Horizontal to Vertical Spectral Ratio: Kajian Literatur dan Pemodelan. *Jurnal Neutrino*, 4(1).