

PENCITRAAN STRUKTUR KECEPATAN GROUP GELOMBANG RAYLEIGH DI PULAU SULAWESI DAN NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY

IMAGING OF RAYLEIGH WAVE GROUP VELOCITY STRUCTURE ON SULAWESI AND EAST NUSA TENGGARA ISLAND USING AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY

Muhamad Fadhilah^{1*}, Abdul Haris², Bayu Pranata³, Agustya Adi Martha³,
Nova Heryandoko³, Supriyanto Rohadi³

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Indonesia,

²Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Indonesia,

³Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

*E-mail: muhamadfadhilah16@gmail.com

Naskah masuk: 29 Juni 2021

Naskah diperbaiki: 30 Juni 2021

Naskah diterima: 6 Juli 2021

ABSTRAK

Pulau Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur (NTT) merupakan wilayah yang memiliki tatanan tektonik kompleks, sehingga penting untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan wilayah tersebut. Metode *Ambient Noise Tomography* (ANT) digunakan untuk memahami struktur tektonik tersebut dengan mencitrakan struktur kerak atas di area penelitian. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan *waveform* komponen vertikal dari 89 seismograf INATEWS-BMKG di Pulau Sulawesi dan NTT mulai Januari 2020 hingga Mei 2021. Secara umum, tahap pertama dimulai dari persiapan data tunggal dan korelasi silang untuk memperkirakan fungsi Green antara pasangan stasiun. Estimasi waktu tempuh group gelombang Rayleigh diperoleh dari waktu tunda hasil korelasi silang. Teknik analisis frekuensi-waktu (*Frequency-Time Analysis*) digunakan untuk mendapatkan kurva dispersi untuk mengukur kecepatan group antar stasiun. Kecepatan grup digunakan sebagai input dalam inversi tomografi. Proses tomografi dilakukan dengan menggunakan FMST v1.1 dimana pemodelan *forward* dan *inverse* dilakukan secara iteratif. Peta yang diperoleh dari hasil pemodelan menunjukkan variasi kecepatan group gelombang Rayleigh di daerah penelitian berkisar antara 1,8 – 2,5 km/s. Secara umum, hasil yang diperoleh berkorelasi cukup baik dengan kondisi geologi pada wilayah penelitian.

Kata kunci: *Ambient Noise Tomography, Frequency-Time Analysis, Green's function, cross- correlation, Sulawesi*

ABSTRACT

Sulawesi and East Nusa Tenggara (NTT) are areas with complex tectonic setting, so it is important to describe the subsurface conditions of the region. Ambient Noise Tomography (ANT) method was used to understand the tectonic structure by imaging the structure of the upper crust in the study area. The data used in this study are vertical component waveforms from 89 INATEWS-BMKG seismographs on Sulawesi and NTT islands from January 2020 to May 2021. In general, the first stage of the data processing focuses on single data preparation and cross-correlation to estimate the green's function between station pairs. The estimated travel time of the Rayleigh wave group is obtained from the cross-correlation delay time. Frequency-Time Analysis technique is used to obtain a dispersion curve to measure the group velocity between stations. The group velocity is used as an input in the tomography inversion. The tomography process was carried out using FMST v1.1 where forward and inverse modelling were performed iteratively. The results map from the modelling shows that Rayleigh wave group velocities in this study area ranging from 1.8 to 2.5 km/s. In general, the results obtained are quite well correlated with the geological conditions in this study area.

Keywords: *Ambient Noise Tomography, Frequency-Time Analysis, Green's function, cross- correlation, Sulawesi*

1. Pendahuluan

Pulau Sulawesi dan NTT memiliki tatanan geologi yang kompleks dan masih aktif bergerak hingga saat ini sehingga sering terjadi gempa bumi di daerah ini. Tatanan geologi Sulawesi dan NTT yang kompleks disebabkan oleh pertemuan tiga lempeng besar, yaitu

lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara, lempeng Eurasia yang bergerak ke selatan-tenggara, dan lempeng Pasifik yang bergerak ke barat. Selain ketiga lempeng makro tersebut terdapat lempeng mikro yaitu lempeng Filipina yang juga aktif bergerak [1].

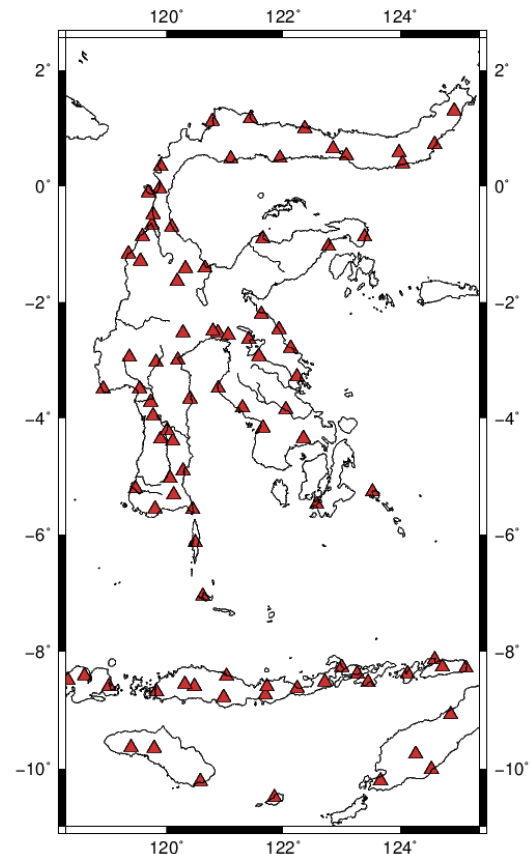
Ada beberapa macam metode geofisika yang dapat digunakan untuk mencitrakan struktur bawah permukaan, seperti tomografi seismik, tomografi kecepatan group gelombang permukaan dan *receiver function*. Di antara semua metode ini, tomografi seismik adalah yang paling sering digunakan. Tomografi seismik adalah suatu metode untuk merekonstruksi struktur bawah permukaan dengan data seismik yang direkam pada penerima (*receiver*) yang memanfaatkan data waktu tempuh gelombang. Konsep dasar metode tomografi adalah menggambarkan kondisi struktur bumi bawah permukaan dengan melakukan pemodelan *forward* dan *inverse* yang dilakukan secara berulang hingga diperoleh data waktu tempuh yang dihitung berdasarkan model terbaru yang paling sesuai dengan pengamatan waktu tempuh.

Pada penelitian ini kami menggunakan metode *Ambient Noise Tomography* (ANT). Metode ANT adalah metode yang memanfaatkan interferometri seismik, yang merupakan prinsip pembangkitan respon seismik baru dari sumber virtual dengan korelasi silang antara sinyal seismik yang direkam di lokasi penerima yang berbeda [2]. Metode ANT digunakan untuk memperoleh tomografi kecepatan gelombang bawah permukaan pada wilayah penelitian dengan memanfaatkan data *ambient noise* atau *noise* dari lingkungan. Metode ANT telah diterapkan di Indonesia untuk mencitrakan bawah permukaan dangkal di Danau Toba, Sumatera Utara [3], Jawa Tengah [4], Cekungan Jakarta [5], Cekungan Bandung [6], struktur kerak atas di bawah Jawa Timur-Bali [7], Jawa Barat [8], dan Lombok [9].

2. Data dan Metode

Lokasi penelitian meliputi Pulau Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur, dengan batasan wilayah 10,98 LS - 2,56 LU dan 118,27 - 125,36 BT. Data diperoleh dari hasil rekaman 89 sensor permanen milik Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sebaran sensor diperlihatkan pada Gambar 1 dengan rincian 62 sensor di Pulau Sulawesi dan 27 sensor di Nusa Tenggara Timur.

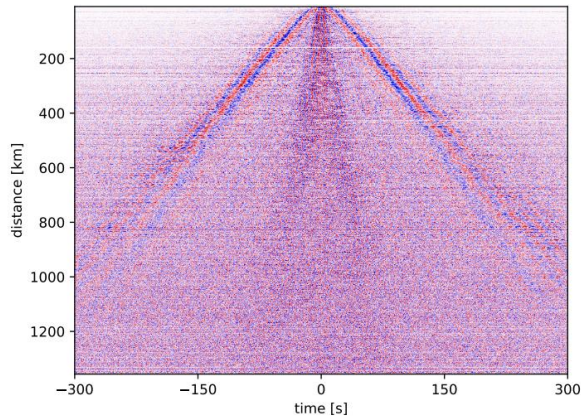
Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data seismik komponen vertikal dari sensor seismometer jaringan INATEWS-BMKG. Bentuk data yang digunakan adalah *raw* data rekaman kontinu perhari dari masing - masing sensor selama 1 tahun dari tanggal 1 Januari 2020 hingga 1 Januari 2021 dalam format *MiniSeed*. *Software* yang digunakan dalam pengolahan data sinyal seismik *ambient noise* pada penelitian ini yaitu NoisePy [10] dan FMST v1.1 [11]. Secara garis besar tahapan dalam melakukan penelitian dibagi menjadi beberapa bagian yaitu persiapan data tunggal, korelasi silang dan *stacking*, pengukuran kurva dispersi, tomografi kecepatan dan interpretasi hasil penelitian.



Gambar 1. Peta sebaran sensor yang digunakan dalam penelitian (segitiga merah merupakan seismograf INATEWS-BMKG).

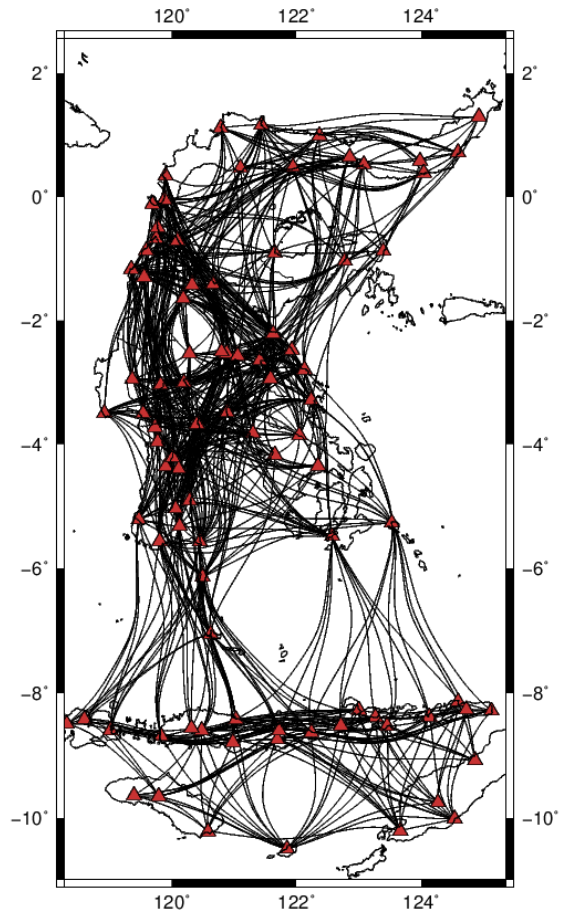
Pada persiapan data tunggal, data rekaman seismik dengan format *miniseed* dikonversi menjadi *asdf* menggunakan NoisePy. Selanjutnya dilakukan koreksi instrumen, *demeaning*, *detrending*, *spectral whitening*, dan *filtering* pada rentang frekuensi 0,01 - 4 Hz dengan normalisasi yang digunakan adalah normalisasi *Robust Multichip Average* (RMA). Proses *filtering* dilakukan untuk menghindari frekuensi rendah yang disebabkan oleh variasi temperatur dan tekanan.

Tahapan berikutnya adalah proses *stacking*. Proses *stacking* dilakukan sebagai proses penjumlahan *trace-trace* dalam satu *gather* data yang bertujuan untuk mempertinggi rasio sinyal terhadap noise. Sinyal yang koheren akan terkuatkan dan sinyal yang tidak koheren akan diperlemah melalui proses ini. Hasil *stacking* yang diperoleh digunakan untuk melihat kecepatan rata-rata di wilayah penelitian. *Stacking* dilakukan di setiap stasiun sesuai ketersediaan data. Kemudian dilakukan korelasi silang dan menghasilkan 3645 fungsi korelasi silang (CCF). Seluruh CCF kemudian diplot dalam grafik yang biasa disebut *cross-correlation gathering* (CCG) yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil *stacking* korelasi silang antar pasangan stasiun pada periode 1-100 detik.

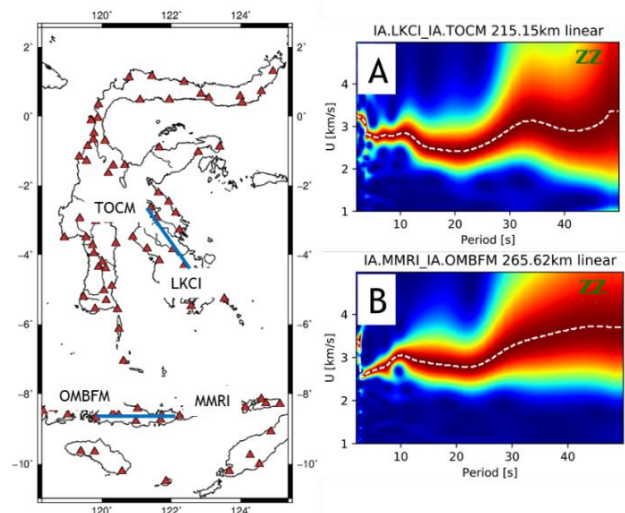
Sebelum dilakukan tomografi kecepatan group gelombang Rayleigh di daerah penelitian, terlebih dahulu dilakukan uji resolusi yang berfungsi untuk melihat seberapa baik geometri sebaran sumber dan penerima semu terhadap kondisi bawah permukaan yang akan dipetakan. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat data sintesis kecepatan gelombang, menambahkan *noise* Gaussian, kemudian menerapkan tomografi pada data sintesis. Tomogram inversi akan memiliki cakupan area resolusi yang berbeda tergantung pada penyebaran *raypath*. Secara umum, semakin banyak *raypath* yang melewati suatu area, semakin tinggi resolusinya. Gambar 3 menunjukkan distribusi *raypath* dalam wilayah penelitian.



Gambar 3. Distribusi *raypath* dalam wilayah penelitian (segitiga merah merupakan seismograf INATEWS-BMKG).

Setelah diperoleh fungsi korelasi silang (CCF), kemudian dilakukan analisis kurva dispersi. Kurva dispersi antar stasiun digunakan untuk melakukan tomografi gelombang permukaan untuk mendapatkan peta kecepatan group gelombang Rayleigh. Metode inversi tomografi yang digunakan adalah inversi linier. Parameter yang diatur adalah jumlah grid 38 x 20, dengan *smoothing* dan *damping* 25.

Kurva dispersi pada setiap stasiun menggunakan rentang kecepatan 1,0-5,0 km/s. Hal ini didasarkan pada analisis model kecepatan awal bahwa kecepatan rata-rata diperkirakan sekitar 2,0 km/s. Gambar 4 merupakan contoh spektrogram kurva dispersi stasiun LKCI-TOCM dan MMRI-OMBFM.



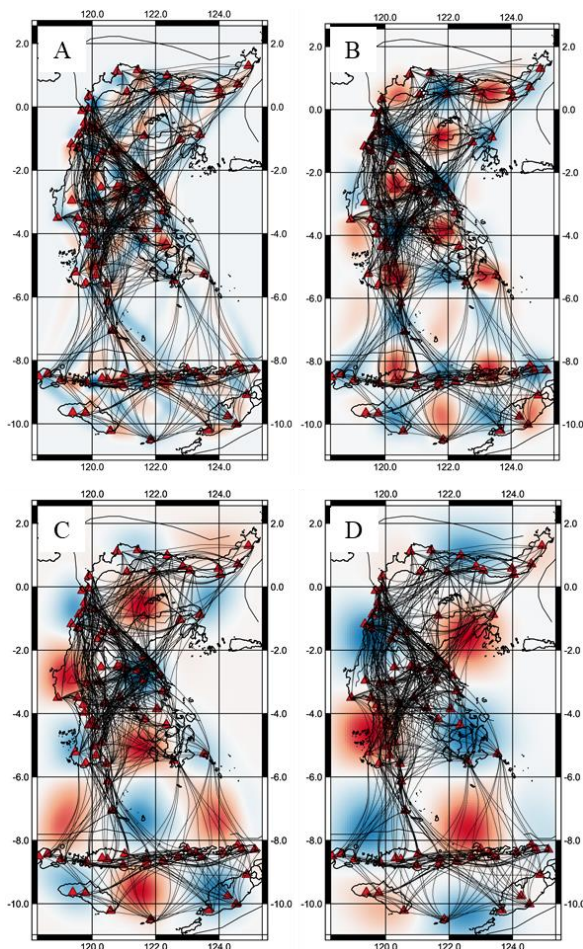
Gambar 4. Kurva dispersi pasangan stasiun (A) LKCI dan TOCM (B) MMRI dan OMBFM.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Uji Resolusi (Tes *Checkerboard*)

Tahap selanjutnya dari pengolahan data dalam penelitian ini yaitu uji resolusi. Tujuan dilakukan uji resolusi pada penelitian ini yaitu untuk mengetahui nilai resolusi dari wilayah yang akan diinterpretasikan. Uji resolusi dilakukan menggunakan tes *checkerboard* dengan membuat model data sintetik dengan model awal berupa papan catur.

Pada penelitian ini dibuat model papan catur dengan ukuran sel 40 x 40 km untuk periode 2 detik dengan faktor *smoothing* dan *damping* 25. Tujuan dari nilai *damping* adalah untuk memberikan berat peredam sehingga nilai model *recovery* tidak jauh dari model awal. Pemilihan ukuran sel 40 x 40 km didasari oleh hasil dari model *recovery* yang paling optimal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



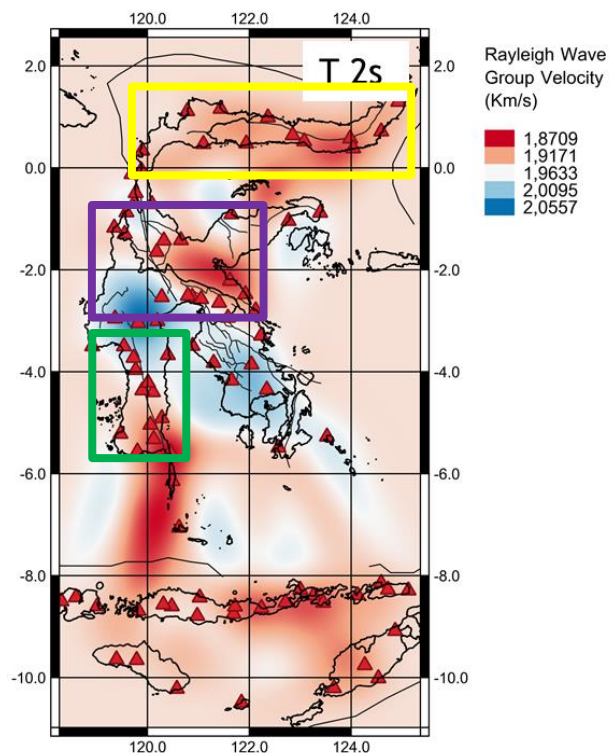
Gambar 5. Hasil uji checkerboard di Sulawesi dan NTT pada periode 2 detik (A) ukuran sel 20 x 20 km (B) 40 x 40 km (C) 60 x 60 km (D) 80 x 80 km (segitiga merah merupakan stasiun seismik dan garis hitam merupakan *raypath*).

Berdasarkan hasil uji resolusi, model *recovery* menunjukkan secara keseluruhan wilayah Pulau Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur berada pada daerah dengan nilai resolusi yang dapat diterima dengan baik. Klasifikasi penilaian resolusi baik dengan berdasarkan jumlah sel yang dipulihkan kembali sehingga interpretasi dapat dilakukan pada wilayah tersebut.

3.2. Hasil Tomografi *Ambient Noise*

3.2.1. Tomogram Periode 2 detik

Hasil tomografi *ambient noise* pada periode 2 detik yang terdapat pada Gambar 6 menunjukkan hasil yang cukup baik setelah dilakukan perbandingan dengan kondisi geologi wilayah Sulawesi yang terdapat pada Gambar 7. Terlihat pada Gambar 6 (kotak kuning) di bagian lengan utara Sulawesi menunjukkan adanya zona kecepatan rendah yang ditandai dengan warna merah pada kecepatan 1.8 – 1.9 km/s. Hal ini berkaitan dengan rangkaian gunung api Kuartar yang umumnya terdiri dari batuan vulkanik Kenozoikum dan batuan plutonik yang mendominasi sebagian besar lengan Sulawesi bagian utara.

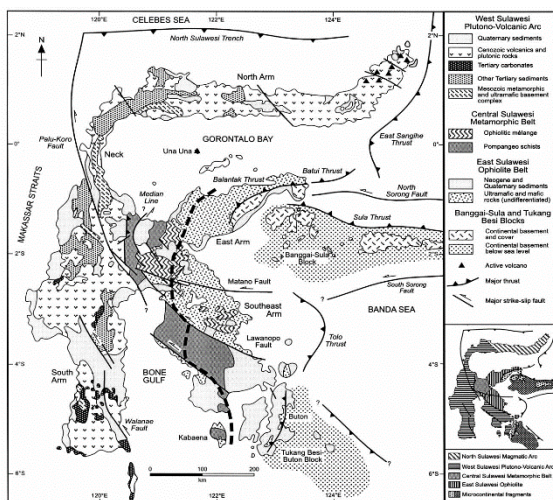


Gambar 6. Peta kecepatan group gelombang Rayleigh periode 2 detik di Pulau Sulawesi dan NTT (segitiga merah merupakan stasiun seismik dan garis hitam merupakan patahan).

Batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi di lengan utara Sulawesi dapat dijelaskan oleh beberapa parameter, seperti batuan yang lunak, densitas rendah, terdiri dari fluida, dan memiliki temperatur tinggi. Gunung api kuarter yang mendominasi pada bagian lengan utara Sulawesi tersusun dari batuan vulkanik kuarter yang memiliki sifat lepas dan terdekomposisi, namun tersusun dengan baik. Kondisi ini yang menyebabkan sekuen vulkanik di wilayah lengan utara Pulau Sulawesi berada pada batas antara zona anomali kecepatan rendah dan anomali kecepatan tinggi.

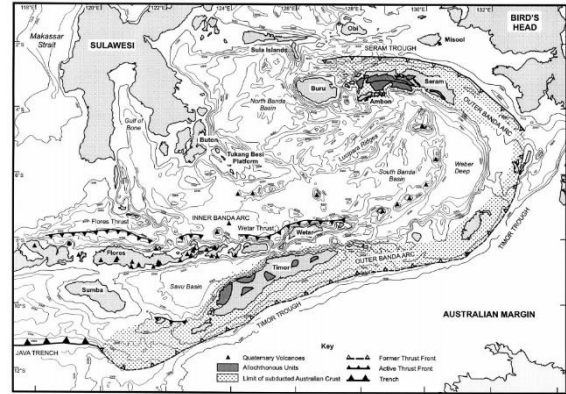
Pada bagian Sulawesi Tengah, tampak adanya batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi dari tenggara ke barat laut di Sesar Palu-Koro. Hal ini dapat dilihat adanya perbedaan warna dalam peta pada Gambar 6 (kotak ungu) yang menggambarkan kemenerusan dari sesar Palu-Koro. Kondisi geologi Sulawesi yang ditunjukkan Gambar 7 menunjukkan adanya sabuk Metamorf Sulawesi Tengah yang memiliki kecepatan lebih rendah dari sekitarnya karena adanya pembentukan batuan yang lebih muda.

Di lengan Selatan Pulau Sulawesi, kecepatan group gelombang Rayleigh meningkat dari selatan ke utara. Tampak jelas batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi di Sesar Walanae (kotak hijau). Batuan sedimen mendominasi sebagian besar Lengan Sulawesi Selatan, terutama di sepanjang pantai dan di tengah lengan ini. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, kondisi geografi lengan selatan terdiri dari batuan vulkanik Kenozoikum dan batuan plutonik. Hal ini yang menjadi penyebab terjadinya peningkatan kecepatan dari selatan ke utara. Kecepatan juga meningkat ke timur laut menuju lengan tenggara Pulau Sulawesi. Di wilayah lengan Tenggara, nilai kecepatan didominasi oleh anomali tinggi.



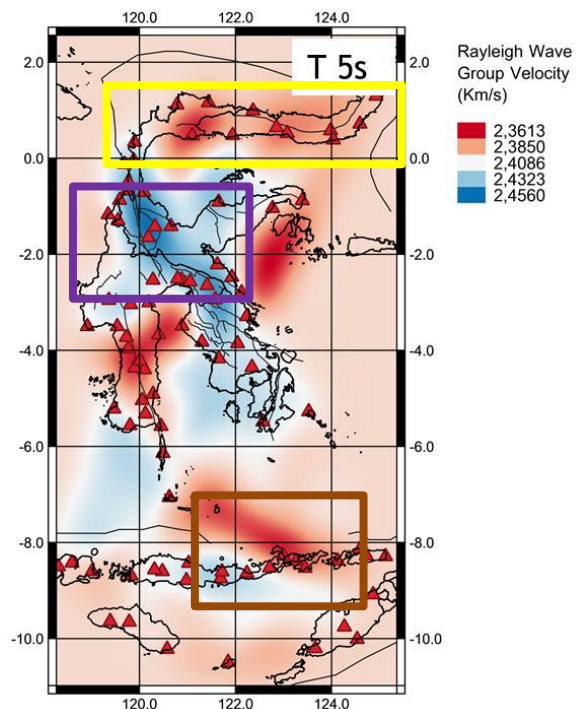
Gambar 7. Peta Geologi Sulawesi [12].

Pada periode 2 detik, wilayah utara Nusa Tenggara Timur didominasi oleh anomali kecepatan rendah dengan rentang kecepatan 1,8-1,9 km/s. Kondisi geologi Nusa Tenggara Timur dapat dilihat pada Gambar 8. Pada bagian utara Nusa Tenggara Timur didominasi oleh pegunungan vulkanik. Hasil anomali rendah dari tomogram periode 2 detik berkesesuaian dengan kondisi geologi wilayah Nusa Tenggara Timur.



Gambar 8. Geologi Regional Busur Banda [12].

3.2.2 Tomogram Periode 5 detik



Gambar 9. Peta kecepatan group gelombang Rayleigh periode 5 detik di Pulau Sulawesi dan NTT (segitiga merah merupakan stasiun seismik dan garis hitam merupakan patahan).

Gambar 9 menunjukkan hasil dari tomogram untuk periode 5 detik. Hasil pemetaan kecepatan group gelombang Rayleigh tomogram pada periode 5 detik ini menunjukkan hasil yang cukup baik ketika dilakukan analisis perbandingan dengan kondisi geologi wilayah yang terdapat pada Gambar 7, karena kecepatan group gelombang Rayleigh yang dipetakan cukup merepresentasikan kondisi geologi wilayah Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur.

Zona kecepatan rendah dengan kecepatan 2.3 - 2.4 km/s masih dapat diidentifikasi di bagian lengan utara Sulawesi, terlihat pada Gambar 9 (kotak kuning). Hal ini disebabkan oleh batuan penyusun gunung api vulkanik yang terdapat di wilayah lengan utara Sulawesi. Pada bagian Sulawesi Tengah, tampak adanya kontras antara batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi dari tenggara ke barat laut di Sesar Palu-Koro (Gambar 9, kotak ungu). Hal ini disebabkan oleh pembentukan batuan penyusun yang lebih muda, sehingga terjadi perbedaan kecepatan di wilayah Sulawesi bagian tengah.

Wilayah utara Nusa Tenggara Timur memiliki nilai anomali kecepatan dengan rentang 2,3 - 2,4 km/s. Dapat dilihat pada Gambar 9 (kotak cokelat) adanya anomali kecepatan yang paling rendah di wilayah Maumere dengan nilai 2,3 km/s. Hal ini berkaitan dengan rangkaian gunung api dan batuan terobosan yang berumur Tersier sampai Kuartar yang ada di Pulau Flores.

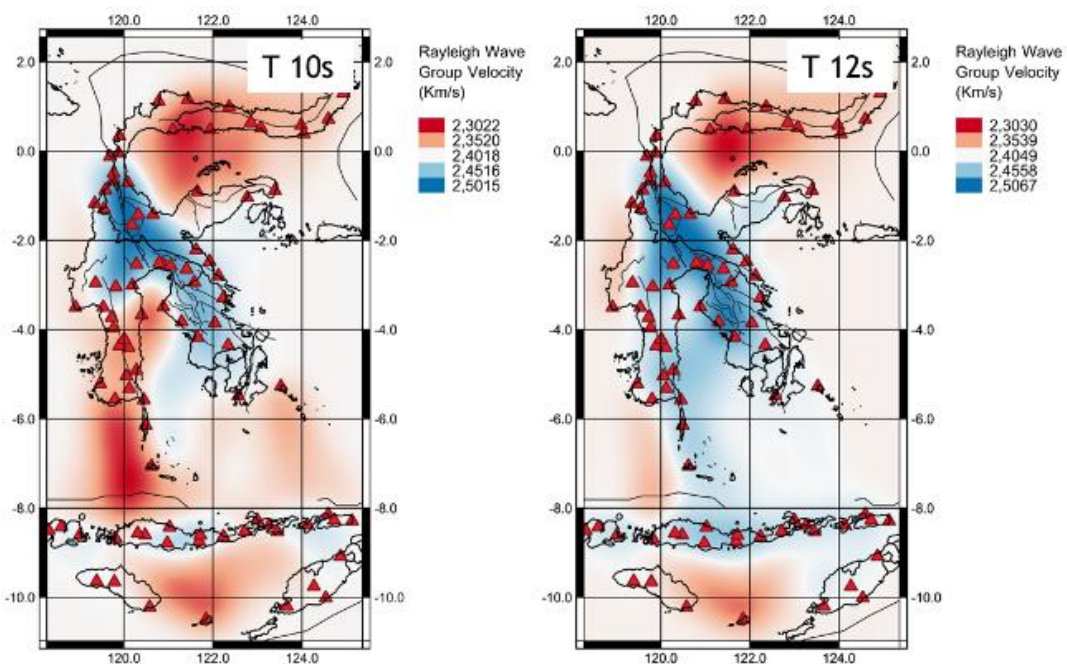
Batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi di pulau Flores dapat dijelaskan oleh

beberapa parameter, seperti batuan yang lunak, densitas rendah, terdiri dari fluida, dan memiliki temperatur tinggi. Gunung api yang ada di pulau Flores tersusun dari batuan vulkanik tersier hingga kuartar yang memiliki sifat lepas dan terdekomposisi, namun tersusun dengan baik. Kondisi ini dapat menjadi penyebab sekuen vulkanik di wilayah ini berada pada batas antara zona anomali kecepatan rendah dan anomali kecepatan tinggi.

3.2.3 Tomogram Periode 10 dan 12 detik

Pada Gambar 10 menunjukkan hasil dari tomogram pada periode 10 dan 12 detik di wilayah Sulawesi dan Nusa Tenggara Timur. Kecepatan group gelombang Rayleigh pada periode ini didominasi oleh kecepatan tinggi pada rentang kecepatan 2,3 - 2,5 km/s. Zona kecepatan rendah masih dapat diidentifikasi di bagian lengan utara Sulawesi yang berkaitan dengan kondisi geologi setempat. Pada wilayah Nusa Tenggara Timur, wilayah dengan anomali kecepatan gelombang Rayleigh paling rendah berada di Pulau Sumba dan Timor. Kondisi geologi dari Pulau Sumba dan Timor yang tersusun atas batuan yang lebih muda menjadi penyebab wilayah ini memiliki kecepatan gelombang Rayleigh yang paling rendah dibandingkan dengan wilayah sekitarnya.

Berdasarkan hasil tomogram periode 2, 5, 10, dan 12 detik tampak bahwa nilai kecepatan gelombang Rayleigh akan semakin tinggi pada periode panjang. Pada periode yang panjang, gelombang Rayleigh dapat menembus lebih dalam ke lapisan penyusun bumi dan akan tiba lebih awal dibandingkan dengan periode yang lebih kecil.



Gambar 10. Peta kecepatan group gelombang Rayleigh periode 10 dan 12 s di Pulau Sulawesi dan NTT (segitiga merah merupakan stasiun seismik dan garis hitam merupakan patahan).

4. Kesimpulan

Tomogram yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan group gelombang Rayleigh di Sulawesi dan NTT bervariasi antara 1,8 – 2,6 km/s dan umumnya meningkat dengan bertambahnya periode atau kedalaman. Secara umum interpretasi tersebut sesuai dengan kondisi geologi sehingga saling mendukung dalam memahami kondisi bawah permukaan Sulawesi dan NTT. Penggunaan metode ANT pada data seismik *ambient noise* seismograf INATEWS-BMKG menghasilkan tomografi kecepatan group gelombang Rayleigh untuk Sulawesi dan NTT yang secara umum berkorelasi dengan kondisi geologi daerah tersebut. Sesar-sesar di Pulau Sulawesi dapat diidentifikasi dengan jelas pada tomogram yang diwakili oleh batas antara zona kecepatan rendah dan zona kecepatan tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih atas dukungan dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Indonesia (BMKG) berupa data-data yang digunakan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka/References

- [1] Sompotan, A. F., 2012, Struktur Geologi Sulawesi, Perpustakaan Sains Kebumihan Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [2] Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder R., Campman, X., and Verdel, A, 2010, Tutorial on seismic interferometry: Part 1 Basic principles and applications. *Geophysics*, 75, 75A19575A209.
- [3] Stankiewicz, J., Ryberg, T., Haberland, C., and Natawidjaja, D. H. (2010). Lake toba volcano magma chamber imaged by ambient seismic noise tomography. *Geophys. Res. Lett.* 37:L17306. doi: 10.1029/2010GL044211
- [4] Zulfakriza, Z., Saygin, E., Cummins, P. R., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., L'uhr, B.-G., et al. (2014). Upper crustal structure of central Java, Indonesia, from transdimensional seismic ambient noise tomography. *Geophys. J. Int.* 197, 630–635. doi: 10.1093/gji/ggu016
- [5] Saygin, E., Cummins, P. R., Cipta, A., Hawkins, R., Pandhu, R., Murjaya, J., et al. (2016). Imaging architecture of the Jakarta Basin, Indonesia with transdimensional inversion of seismic noise. *Geophys. J. Int.* 204, 918–931. doi: 10.1093/gji/ggv466
- [6] Pranata, B., Yudistira, T., Widiyantoro, S., Brahmantyo, B., Cummins, P. R., Saygin, E., et al. (2019). Shear wave velocity structure beneath Bandung basin, West Java, Indonesia from ambient noise tomography. *Geophys. J. Int.* 220, 1045–1054. doi: 10.1093/gji/ggz49.3
- [7] Martha, A. A., Cummins, P. R., Saygin, E., and Widiyantoro, S. (2017). Imaging of upper crustal structure beneath east Java–Bali, Indonesia with ambient noise tomography. *Geosci. Lett.* 4:14.
- [8] Rosalia, S., Cummins, P. R., Widiyantoro, S., Yudistira, T., Nugraha, A. D., and Hawkins, R. (2020). Group velocity maps using subspace and transdimensional inversions: ambient noise tomography in the western part of Java, Indonesia. *Geophys. J. Int.* 220, 1260–1274. doi: 10.1093/gji/ggz498
- [9] Sarjan, A. F. N., Zulfakriza, Z., Nugraha, A. D., Rosalia, S., Wei, S., Widiyantoro, S., Cummins, P. R., Muzli, M., Sahara, D. P., Puspito, N. T., Priyono, A., Afif, H., 2021, Delineation of Upper Crustal Structure Beneath the Island of Lombok, Indonesia, Using Ambient Seismic Noise Tomography, *Frontiers in Earth Science*, 9, 10.3389/feart.2021.560428
- [10] Jiang, C., and Denolle, M.A., 2020, NoisePy: A New High-Performance Python Tool for Ambient-Noise Seismology, *Seismological Research Letters*, 91 (3), 1853–1866.
- [11] Rawlinson, N., and Sambridge M., 2005, The fast-marching method: An effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media, *Explor. Geophys.*, 36, 341-350.
- [12] Hall, R. and Wilson, M.E.J, 2000, Neogene sutures in eastern Indonesia, *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 781–808.