

Struktur Kerak Dalam Pulau Sumatera Bagian Tengah Berdasarkan Ambient Noise Tomography

The Deep Crustal Structure Beneath The Central Part of Sumatran Island From Ambient Seismic Noise Tomography

Ridho Destawan^{1*}, Tedi Yudistira², Karyanto³

^{1,3} Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Prof. Sumantri Brojonegoro No.1, Bandar Lampung, 35145, Indonesia

² Kelompok Keahlian Geofisika Global, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

Article history:

Received: 11 November 2024

Accepted: 27 Desember 2024

Keywords:

Ambient Noise Tomography (ANT), magmatisme, diapir mantel.

Correspondent author:

destawangridho@eng.unila.ac.id

Abstrak Distribusi lokasi pusat gempa bumi di sepanjang pulau Sumatera lebih terkonsentrasi pada zona *fore-arc*, hal ini menyebabkan resolusi model yang dihasilkan kurang baik untuk zona *back-arc*. Metode *Ambient Seismic Noise Tomography* (ANT) memberikan alternatif untuk meningkatkan resolusi citra tomografi yang diperoleh karena tidak lagi tergantung pada distribusi lokasi gempa bumi, melainkan hanya tergantung pada distribusi stasiun pengamatan seismik di permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan struktur kerak dalam berdasarkan distribusi kecepatan geser (V_s) mulai dari zona *fore arc* hingga *back arc* di wilayah Pulau Sumatera bagian tengah. Data yang digunakan berupa rekaman *waveform* selama April - Desember 2015. Sinyal dispersif jelas terlihat pada data gather untuk rentang periode 5 - 40 s, dengan rata-rata kecepatan grup antara 2,77 - 2,92 km/s dan rata-rata kecepatan fasa antara 3,18 - 4,50 km/s. Hasil ANT pada kedalaman kurang dari 30 km mencitrakan pola anomali kecepatan tinggi disepanjang zona Sesar Sumatera dan jajaran Gunungapi Bukit Barisan yang diinterpretasikan sebagai material sisa proses magmatisme. Sedangkan wilayah *back-arc basin* didominasi oleh kecepatan dengan rentang nilai sedang hingga rendah yang diinterpretasikan sebagai unit sedimen. Pada kedalaman lebih dari 30 km terdapat kontras anomali rendah di sepanjang zona Sesar Sumatera yang diindikasikan sebagai diapir mantel yang berkembang pada daerah penelitian

Abstract. *The distribution of earthquake epicenter locations along the island of Sumatra is more concentrated in the fore-arc zone, this causes*

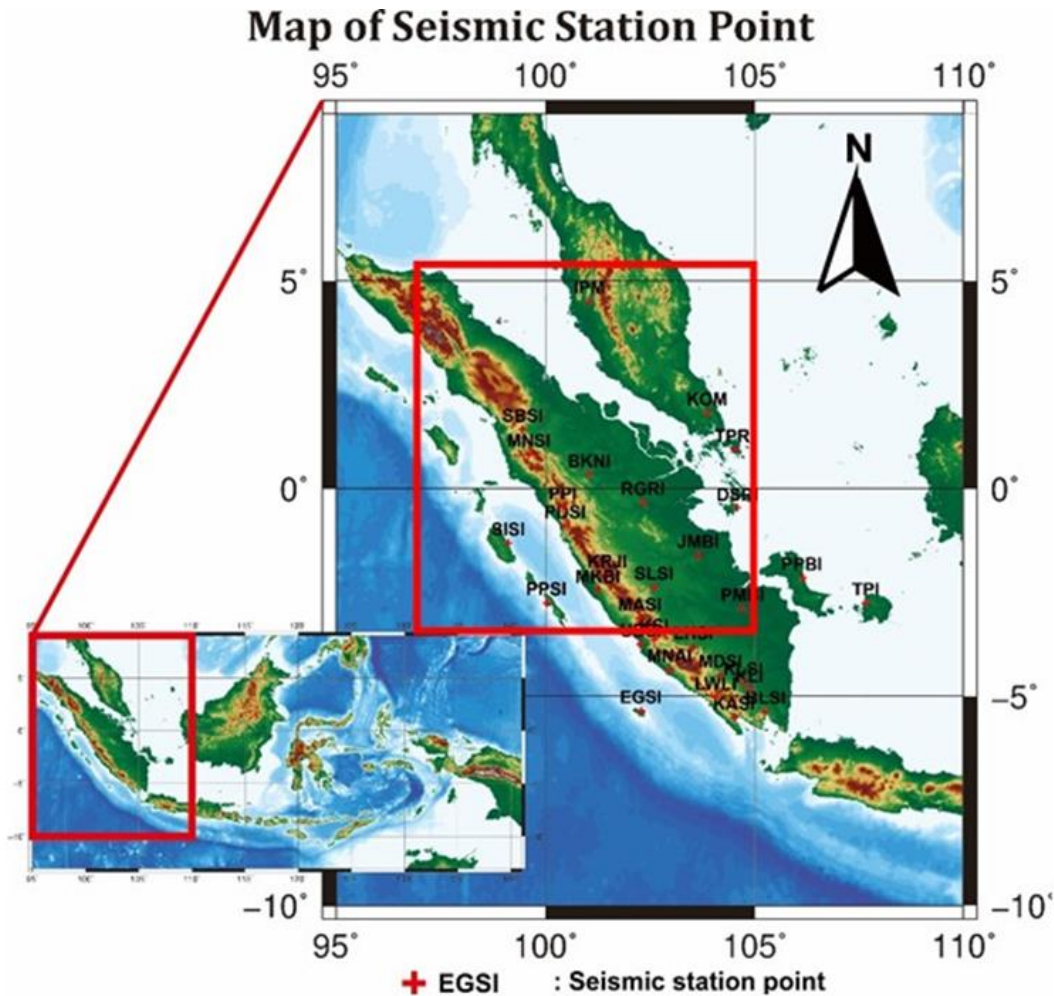
the resulting model resolution to be less good for the back-arc zone. The Ambient Seismic Noise Tomography (ANT) method provides an alternative to increase the resolution of the tomographic images obtained because it no longer depends on the distribution of earthquake locations, but only depends on the distribution of seismic observation stations on the surface. This research aims to obtain the structure of the deep crust based on the distribution of shear velocity (Vs) from the fore arc to the back arc zone in the central part of Sumatra Island. The data used is waveform recordings during April - December 2015. The dispersive signal is clearly visible in the gather data for a period ranging from 5 - 40 s, with an average group speed between 2.77 - 2.92 km/s and an average phase speed between 3.18 - 4.50 km/s. ANT results at a depth of less than 30 km imaged a high speed anomaly pattern along the Sumatran Fault zone and the Bukit Barisan Volcano range which was interpreted as residual material from the magmatism process. Meanwhile, the back-arc basin area is dominated by velocities with a range of medium to low values which are interpreted as sedimentary units. At a depth of more than 30 km there is a low anomalous contrast along the Sumatran Fault zone which is indicated as a mantle diapir developing in the study area.

© 2024 JRGI (Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia)

1. PENDAHULUAN

Secara geologi Pulau Sumatera terletak pada daerah yang kompleks, yaitu pada zona subduksi dan keberadaan Sesar Sumatera yang memotong seluruh tubuh pulau, sehingga menjadikan pulau tersebut senantiasa menarik untuk dilakukan kajian khususnya terkait struktur kerak dalam. Keberadaan jajaran gunungapi di sepanjang zona Sesar Sumatera menunjukkan implikasi dari pergerakan lempeng di sepanjang zona subduksi. Hal ini juga menjadi indikasi awal dari keberadaan sistem magma dangkal di sepanjang zona tersebut. Resolusi tomografi konvensional terbatas pada zona *fore arc*, hal ini karena metode tersebut punya ketergantungan pada persebaran kejadian gempa, sehingga daerah

back arc memiliki resolusi yang kurang baik. Metode *ambient noise seismic tomography* (ANT) merupakan metode yang relatif baru untuk mengetahui informasi kerak dan mantel atas dengan resolusi yang relatif lebih tinggi (Lin dkk., 2008). Metode *ambient noise* tidak terbatas pada daerah-daerah dengan seismisitas tinggi, dan juga cukup aplikabel pada daerah dengan distribusi kejadian gempa yang tidak merata seperti pada zona subduksi di sepanjang Pulau Sumatera. Metode ini dapat digunakan dalam tomografi seismik resolusi tinggi untuk mencitrakan struktur kerak di setiap wilayah dari data kurva disperse hasil korelasi silang antara dua stasiun (Sadeghisorkhani, 2017). ANT diawali dengan melakukan korelasi silang data *waveform*



Gambar 1. Distribusi stasiun pengamatan

antara dua stasiun pengamatan, hal ini bertujuan untuk mendapatkan *empirical Green's function* (EGF) yang umumnya didominasi oleh gelombang permukaan. EGF yang diperoleh memberikan gambaran energi yang menjalar kedalam bumi dari suatu sumber *virtual* ke suatu penerima. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan struktur bawah permukaan berdasarkan distribusi kecepatan geser (V_s) pada wilayah Sumatera Tengah

2. TINJAUAN PUSTAKA

Daerah penelitian secara geologi mencakup sebagian wilayah Cekungan Sumatera Tengah dan Selatan, yang terletak pada zona *back-arc*

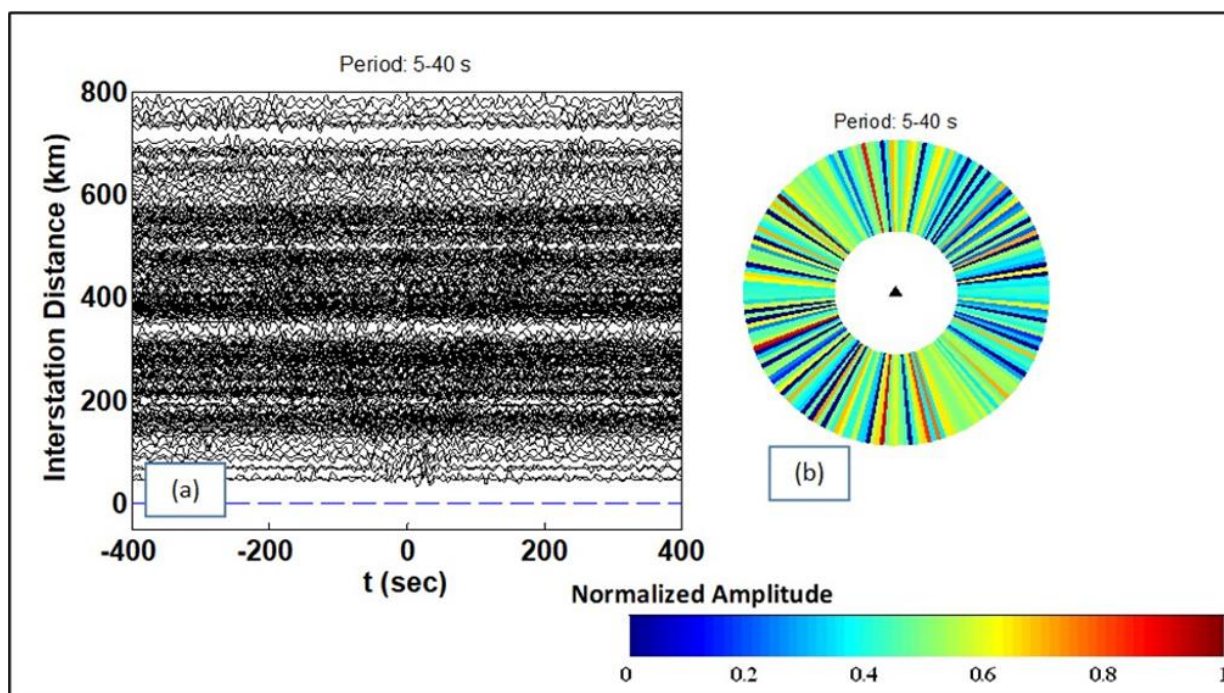
basin Sumatera. Selain itu, daerah penelitian juga mencakup Sesar Mentawai pada wilayah *fore-arc*, segmen Sesar Sumatera dan jajaran gunungapi Bukit Barisan pada wilayah barat laut daratan Pulau Sumatera. Sesar Sumatera terbentuk sebagai hasil dari proses pergerakan relatif lempeng yang memanjang dari ujung Aceh hingga selatan Selat Sunda. Kenampakannya sejajar dengan busur Sunda dan ditandai juga oleh keberadaan busur vulkanik yang dikenal sebagai Bukit Barisan. Sesar Sumatera merupakan sesar mendatar kanan yang terjadi sebagai implikasi dari terjadinya subduksi yang bergerak secara oblique ke arah barat laut (Fitch, 1972; Sieh dan Natawidjaya, 2000).

3. METODE PENELITIAN

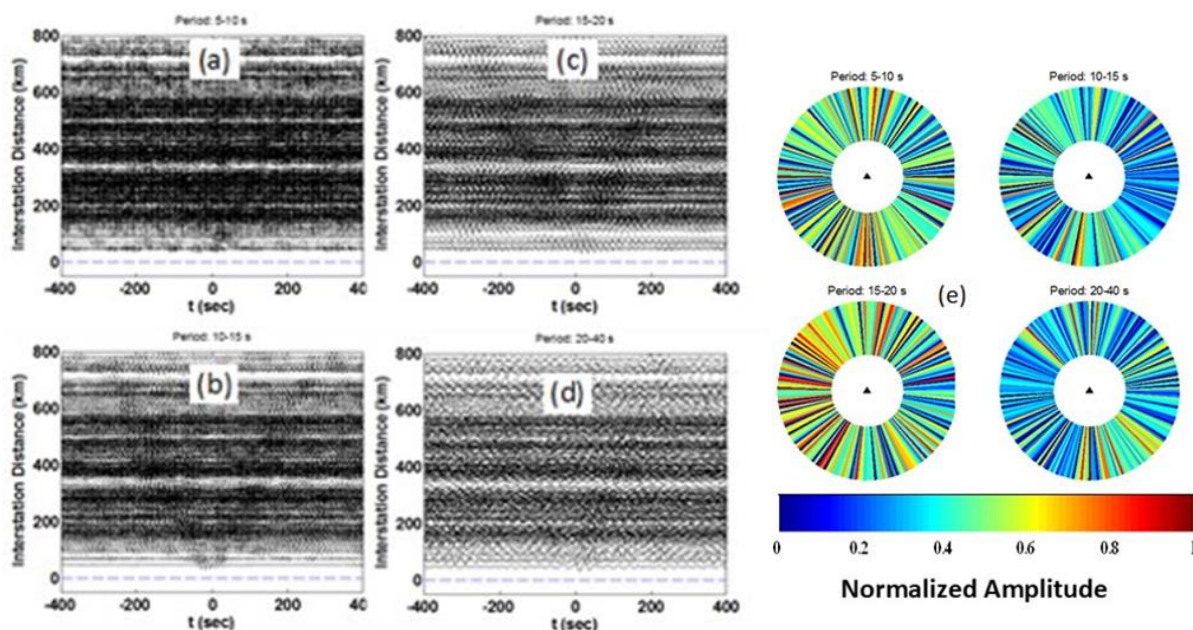
Penelitian menggunakan data *waveform* hasil rekaman 20 stasiun pengamatan BMKG yang terdistribusi di wilayah Sumatera tengah dengan periode waktu rekaman antara April – Desember 2015. Pengolahan data *ambient seismic noise* dilakukan melalui tahapan *single data preparation*, *cross-correlation*, estimasi kecepatan dan tomografi *ambient seismic noise* dari data dispersi. Dalam hal ini menggunakan program yang dikembangkan oleh Yao et al. (2006) dan Fang et al. (2015). Tahapan tomografi tersebut bertujuan untuk menentukan deskripsi model bawah permukaan bumi berdasarkan variasi struktur kecepatan gelombang seismiknya terutama gelombang S (V_s). Model struktur kecepatan V_s yang paling representatif diperoleh melalui proses updating secara iteratif dengan menerapkan *constraint misfit* data dan regularisasi model parameter.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

EGF hasil korelasi silang pada daerah penelitian memperlihatkan rangkaian sinyal dispersif yang terlihat jelas pada rentang periode 5 – 40s, hal ini dapat dilihat dari hasil plot seluruh EGF (**Gambar 2.a**) dimana sumbu vertikal adalah jarak antara-stasiun dan sumbu horizontalnya berupa lag time (s). Rangkaian sinyal dispersif muncul pada lag time positif dan negatif membentuk pola V yang menunjukkan bahwa sumber seismic noise relatif merata (**Gambar 2.a**). Analisa kecepatan awal menunjukkan bahwa kecepatan rata-rata 3.3 km/s. Sedangkan berdasarkan distribusi azimuthal sumber (**Gambar 2.b**) terlihat bahwa distribusi sumber noise relatif merata dari berbagai arah, namun maksimum energi didominasi berasal dari arah laut, yaitu di sisi barat dan timur Pulau Sumatera (ditunjukkan oleh warna merah).



Gambar 2. Empirical Green's function dengan periode 5 – 40s (a) dan distribusi azimuthal energi sumber (b)



Gambar 3. Empirical Green's Function (EGF) dengan rentang periode 5 – 10s (a), 10 – 15s (b), 15 – 20s (c), dan 20 – 40s (d) dan distribusinya (e)

Pada beberapa rentang periode, menunjukkan bahwa pada periode 5 – 10 s sinyal dispersif pada EGF tidak muncul, sedangkan pada periode 10 – 15 s, 15 – 20 s dan 20 – 40 s sinyal dispersif terlihat cukup jelas (Gambar 3.a). Pada rentang periode 5 – 40 s kecepatan gelombang relatif sensitif terhadap kerak hingga mantel atas (Wang dkk., 2017). Berdasarkan distribusi sumber noise pada rentang periode 15 – 20 s sumber noise maksimum didominasi dari arah barat daya – barat laut Pulau Sumatera (**Gambar 3.b**).

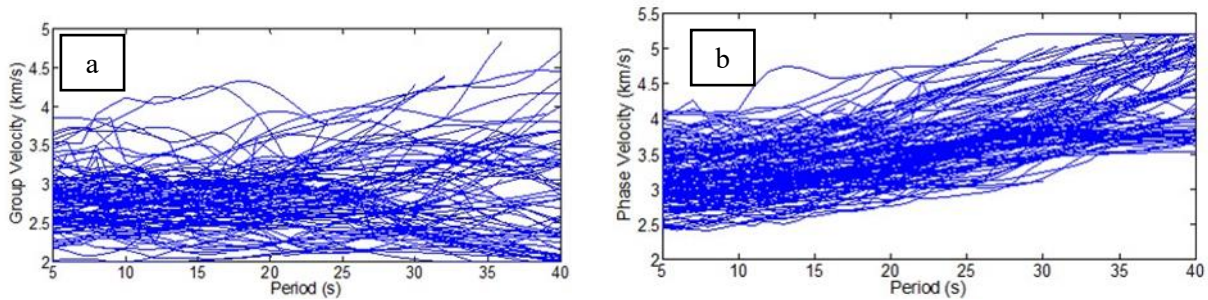
Kondisi tersebut menunjukkan aktivitas mikroseismik primer yang terjadi akibat interaksi gelombang laut (Samudera Hindia) dengan batimeri lantai samudera. Pada rentang periode 20 – 40 s menunjukkan distribusi sumber yang relatif didominasi dari arah selatan – tenggara dan utara yang berasosiasi dengan aktivitas mikroseismik primer periode panjang. Data kecepatan hasil

picking kurva dispersi ini selanjutnya menjadi input dalam tahap ambient noise tomografi (ANT), sehingga diperlukan tahap analisis untuk mengetahui kualitas data yang akan digunakan.

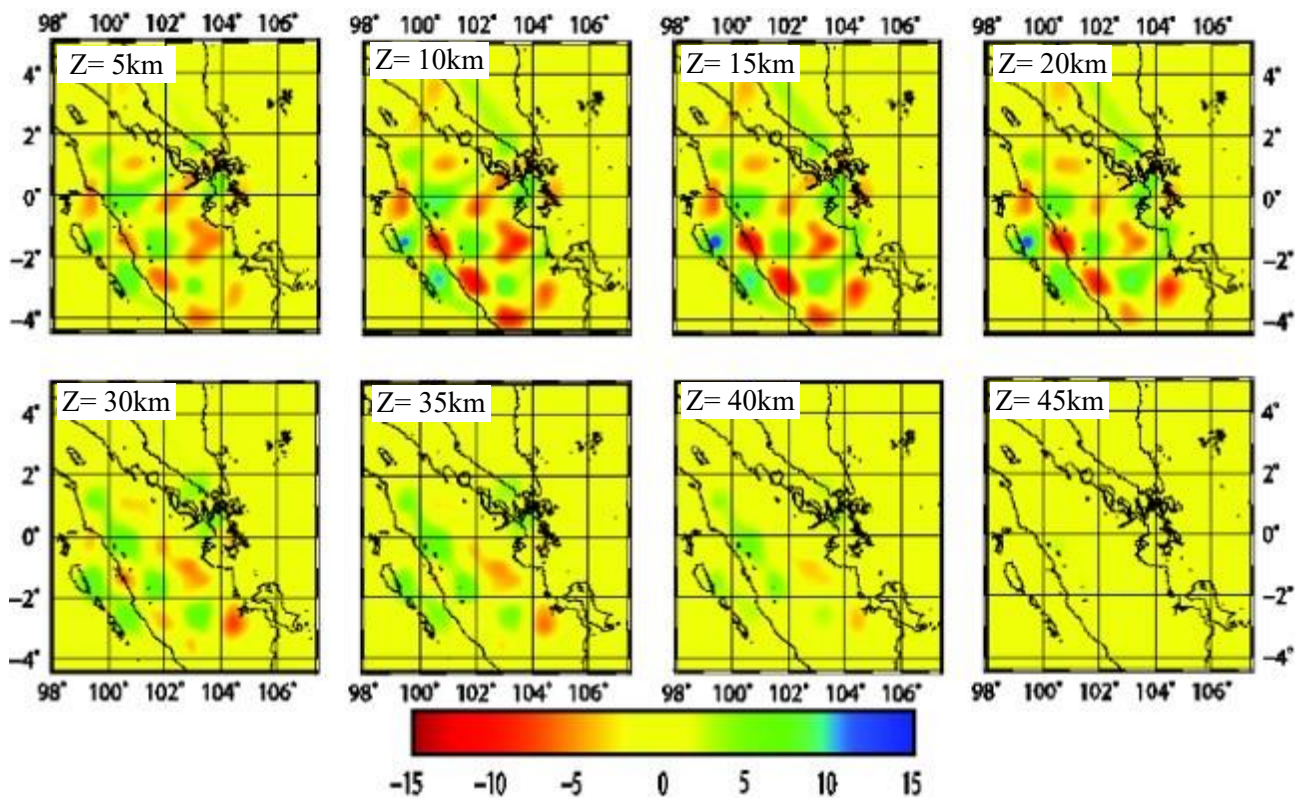
Secara umum, kecepatan fasa menunjukkan pola yang lebih *smooth* dibandingkan dengan kecepatan grup (**Gambar 4**), dimana kecepatan fasa meningkat dan lebih besar dari kecepatan grup seiring dengan bertambahnya periode. Hal ini merupakan karakteristik dari kecepatan grup yang memungkinkan adanya pola minimum lokal walaupun tidak selalu langsung berkaitan dengan strukturnya. Dari 210 EGF yang diperoleh, pada wilayah penelitian dihasilkan 107 kurva dispersi kecepatan grup dan 140 kurva dispersi untuk kecepatan fasa. Rata – rata kecepatan grup untuk rentang periode 5 – 40 s di wilayah penelitian adalah antara 2,77 – 2,92 km/s, dimana hasil tersebut relatif sama dengan hasil penelitian Harmon dkk. (2012) yaitu sekitar

2,98 km/s, sedangkan rata – rata kecepatan fasanya antara 3,18 – 4,50 km/s. Dalam studi ini, kami menggunakan data kecepatan grup dan kecepatan fasa untuk menguji konsistensi hasil model tomografi. Sebelum diaplikasikan pada data lapangan, terlebih dulu dilakukan

uji resolusi melalui uji checkerboard. Berdasarkan hasil uji *checkerboard* ini, pada kedalaman 10 – 20 km, yang berasosiasi dengan struktur kerak dalam, masih memiliki resolusi yang cukup baik (**Gambar 5**).



Gambar 4. Kurva dispersi untuk kecepatan grup (a) dan kecepatan fasa (b)



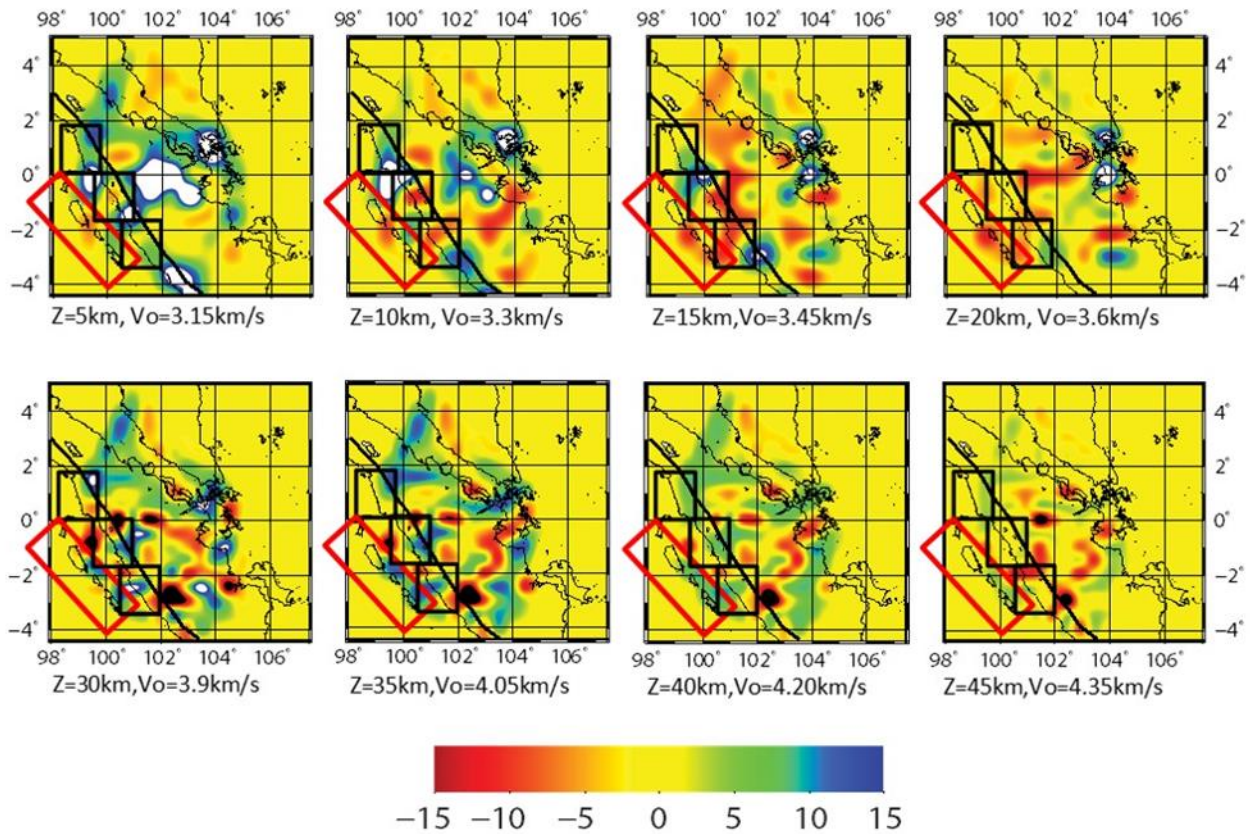
Gambar 5. Hasil uji *checkerboard* untuk kecepatan fasa pada daerah penelitian

Hasil tomografi ANT menunjukkan anomali kecepatan geser (V_s) terlihat cukup bervariasi, baik secara lateral maupun vertikal. Untuk perbandingan dan menguji konsistensi model tomografi maka kecepatan fasa dan grup

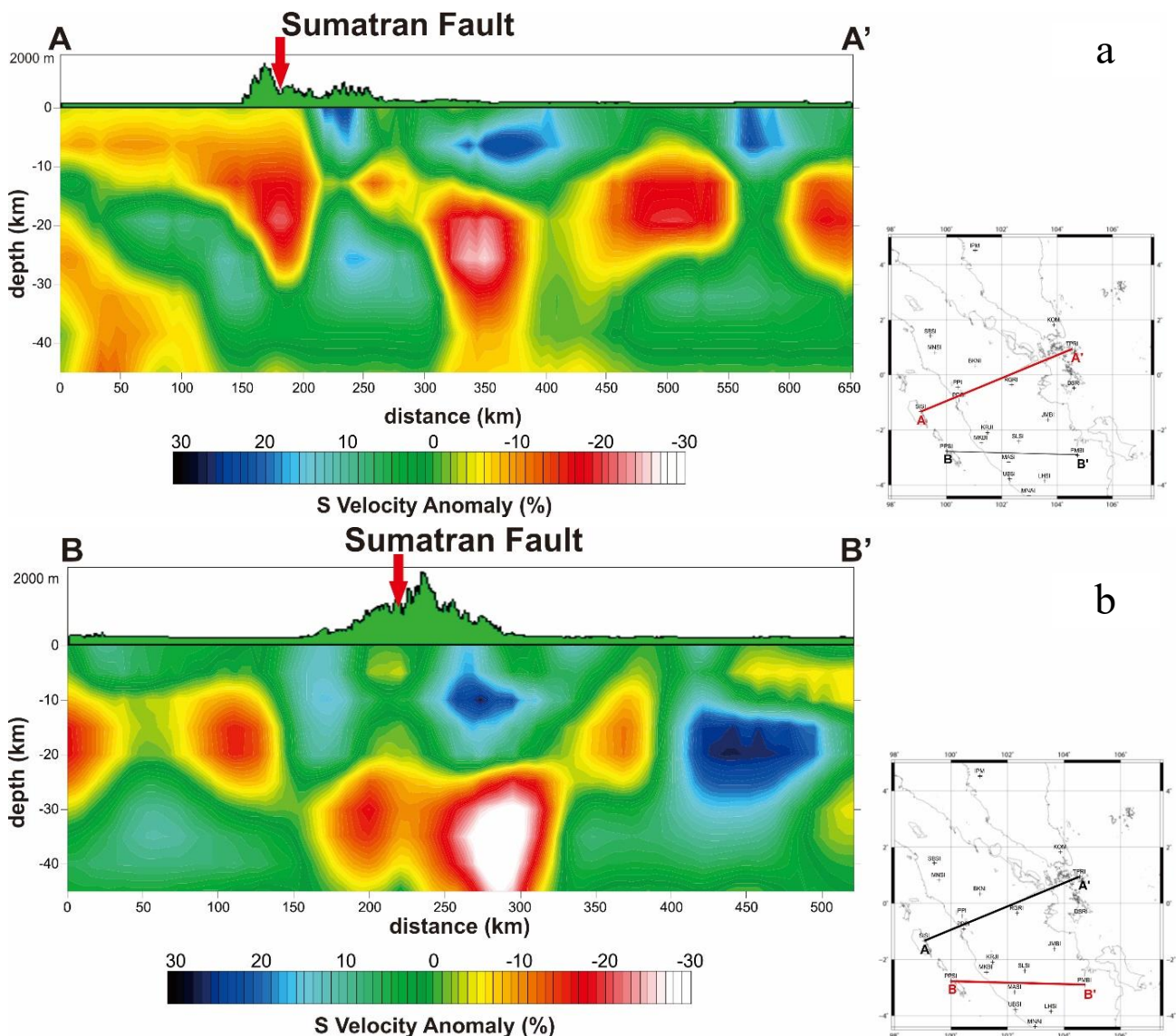
digunakan sebagai *input* inversi secara terpisah. Walaupun memberikan detail variasi yang berbeda tetapi secara umum memberikan pola yang konsisten. Penampang V_s pada kedalaman lebih dari 30 km, hasil dari

tomografi kecepatan fasa memberikan pola anomali yang masih bervariasi secara lateral. Pada kedalaman 5 – 20 km di sekitar Sesar Sumatera ditunjukkan dengan adanya kenampakan anomali rendah (negatif) yang ditandai oleh kotak hitam. Zona tersebut kemungkinan berasosiasi dengan sistem magma dangkal yang diindikasikan sebagai material panas yang mengontrol keberadaan *pull-apart basin* yang berkembang. Berturut-turut kotak hitam pertama berada di sekitar Danau Singkarak, kedua berada pada kompleks Gunung Kerinci dan ketiga berada pada kompleks Hulu Lais. Zona pada kotak kedua dan ketiga merupakan lapangan panasbumi yang sudah beroperasi. **Gambar 6** (tomografi kecepatan fasa) menunjukkan bahwa pada wilayah *fore arc island* ditunjukkan dengan

nilai anomali rendah pada kedalaman 5 – 20 km, tepatnya di wilayah Pulau Pagai, Sipora dan Siberut (dibatasi oleh kotak merah). Hal tersebut merupakan bagian prisma akresi sebagai suatu sedimen yang mengalami pengangkatan dan terkonsolidasi membentuk busur kepulauan. Selain itu kondisi tersebut menunjukkan bahwa tidak adanya ophiolit. Pada kedalaman 30 – 45 menunjukkan nilai anomali yang tinggi (positif) hal tersebut mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut bagian dari lempeng subduksi. Pada kedalaman kurang dari 30 km, bagian *back arc* didominasi oleh nilai anomali sedang hingga rendah yang diinterpretasikan sebagai unit sedimen yang merupakan bagian dari Cekungan Sumatera Tengah.



Gambar 6. Tomogram dari kecepatan fasa pada kedalaman 5 – 45 km



Gambar 7. Penampang sayatan anomali kecepatan geser (V_s)

Hasil tomografi juga menunjukkan hasil yang memiliki korelasi dengan hasil penelitian yang dilakukan Setyanta pada tahun 2015 berdasarkan anomali gaya berat. Pulau Siberut dialasi oleh batuan melange dengan tingkat konsolidasi yang kurang kompak sehingga tingkat kestabilannya kurang baik. Pada wilayah Pulau Sumatera menunjukkan adanya anomali kecepatan geser yang sangat rendah di bawah zona Sesar Sumatera pada kedalaman lebih dari 10 km dibawah permukaan air laut

dan diinterpretasikan sebagai material panas yang mengontrol sistem magma di wilayah tersebut (**Gambar 7a**). Anomali kecepatan geser tinggi dengan kedalaman 0 – 10 km pada jarak 325 – 400 km diinterpretasikan sebagai tinggian-tiga-puluh yang membatasi cekungan sumatera tengah dan selatan. Pada wilayah Pulau Pagai terletak pada akresi relatif lebih dalam dari Pulau Siberut. Selain itu, pada wilayah *fore arc* basin menunjukkan adanya diskontinuitas anomali yang diinterpretasikan

sebagai zona Sesar Mentawai yang berkembang pada daerah penelitian (**Gambar 7b**). Pada wilayah *back arc* basin ditunjukkan dengan adanya zona anomali rendah yang diinterpretasikan sebagai bagian dari cekungan sumatera selatan sebagai unit sedimen. Zona anomali rendah pada kedalaman > 30 km diinterpretasikan sebagai magma *chamber* yang berkembang pada zona sesar sumatera. Zona sesar mewakili bagian yang lemah yang sangat memudahkan magma untuk menerobos sehingga berpengaruh pada terbentuknya jajaran gunungapi Bukit Barisan di sepanjang Sesar Sumatera. Hasil tersebut juga mengkonfirmasi hipotesa hasil penelitian Muraoka dkk., (2010) terkait model penampang *pull-apart basin* dan distribusi kedalaman zona transisi *brittle-plastis* yang berkembang di sepanjang Sesar Sumatera

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan model tomografi yang diperoleh maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini.

- a. Interferometri *ambient seismic noise* dari jaringan stasiun pengamatan BMKG yang terdistribusi di wilayah Sumatera Tengah memberikan hasil *empirical Green's function* (EGF) gelombang Rayleigh dengan rangkaian sinyal dispersif yang cukup baik pada rentang periode 5 – 40 s.
- b. Distribusi sumber *noise* pada wilayah Sumatera Tengah relatif merata dengan energi maksimum berasal dari arah Samudera Hindia. Rata-rata kecepatan grup pada daerah penelitian berkisar antara 2.8

– 3.0 km/s dan kecepatan fase antara 3.0 – 4.50 km/s.

Walaupun secara umum menunjukkan konsistensi, tomografi data kecepatan fasa memberikan resolusi yang relatif lebih baik dari tomografi data kecepatan grup. Pada kedalaman 5 – 20 km pola anomali kecepatan tinggi di sepanjang Sesar Sumatera diinterpretasikan sebagai material hasil pembekuan magma gunungapi, sedangkan anomali kecepatan rendah (negatif) diinterpretasikan sebagai magma *chamber* yang mengontrol aktivitas vulkanik di sepanjang Bukit Barisan. Anomali rendah di bawah Pulau Sumatera pada kedalaman lebih dari 30 km diinterpretasikan sebagai diapir mantel yang berkembang

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Hongjian Fang dan Huajian Yao yang telah memberikan perangkat lunak pengolahan data. Tahapan korelasi silang menggunakan NoiseCorr_SAC_v4.m dan DsurfTomo untuk inversi 3D Vs. Gambar diolah menggunakan Generic Mapping Tool (GMT) (Wessel dan Smith, 1995; Wessel dan Smith, 1998). Penulis juga berterima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), yang telah memberikan akses data secara *online* penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Fang, H., Yao, H., Zhang, H., Huang, Y. C., & van der Hilst, R. D. (2015). Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing:

- methodology and application. *Geophysical Journal International*, 201(3), 1251-1263
- Fitch, T. J., Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific, *J. Geophys. Res.*, 77, 4432-4462, 1972.
- Harmon, N., Henstock, T., Tilmann, F., Rietbrock, A., Barton, P. (2012): Shear velocity structure across the Sumatran Forearc-Arc. - *Geophysical Journal International*, 189, 3, pp. 1306—1314.
- Lin, F., M.P. Moschetti, and M.H. Ritzwoller, (2008): Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j1365-246X.2008.03720.x
- Muraoka, H., Takahashi, M., Sundhoro, H., Dwipa, S., Soeda, Y., Momita, M., and Shimada, K., 2010, Geothermal Systems Constrained by the Sumatran Fault and Its Pull-Apart Basins in Sumatra, Western Indonesia, *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010
- Sieh, K., and Natawidjaja, D.H., (2000): Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia, *J. geophys. Res.*, 105, 28 295–228 326
- Wang, Y., Fan-Chi Lin, Schmandt, B., and Farrell, J., (2017): Ambient noise Tomography across Mount St. Helens using a dense seismic array, *AGU*, doi: 10.1002/2016JB013769
- Yao, H., van der Hilst R.D., and de Hoop, M.V., 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis : I - Phase velocity maps. *Geophys.J. Int.*, Vol. 166(2), 732-744, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- .