

Tomografi Kecepatan Seismik 3D Daerah Danau Toba Menggunakan SimulPS12

Novia Anggraini^{1,*}, Dwi Pujiastuti¹, Atin Nur Aulia²

¹Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas.
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

²Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI Jl. Sangkuriang, Kompleks LIPI,
Bandung, 40135, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 24 Agustus 2020
Direvisi: 14 September 2020
Diterima: 4 Oktober 2020

Kata kunci:

Danau Toba
SimulPS12
tomografi seismik 3D

Keywords:

Toba Lake
SimulPS12
3D seismic tomography

Penulis Korespondensi:

Novia Anggraini
Email: noviaanggraini038@gmail.com

ABSTRAK

Gunung Toba adalah salah satu gunung purba di Indonesia yang berada di Sumatera Utara. Terdapat dua aktivitas yang mempengaruhi gunung tersebut, yaitu aktivitas vulkanik yang berasal dari magma di bawahnya dan aktivitas tektonik yang berasal dari subduksi Lempang Indo-australia. Meskipun sudah lebih dari 70.000 tahun sejak terakhir kali erupsi dan menyebabkan terbentuknya kaldera vulkano-tektonik tersebar di dunia, yaitu Kaldera Toba, aktivitas-aktivitas tersebut masih ada. Salah satu hal yang dapat dilakukan untuk mengetahui keadaan di bawahnya adalah dengan melakukan tomografi kecepatan seismik 3D. Pada penelitian ini, program yang digunakan adalah SimulPS12 dan menghasilkan tomogram anomali V_p , V_s dan rasio V_p/V_s . Berdasarkan hasil tomografi tersebut diketahui bahwa zona lemah terdapat pada kedalaman 30 km di bagian tengah Danau Toba dan kedalaman 50 km. Adapun proses *partial melting* terjadi pada kedalaman sekitar 130 km hingga 50 km yang berasal dari slab subduksi di bawah Danau Toba. Pada kedalaman 30 km, selain anomali negatif, juga terlihat pola anomali V_p dan V_s positif yang mengindikasikan keberadaan bekas conduit dari intrusi magma yang membeku. Selain itu, aktivitas seismik juga terlihat tersebar pada beberapa titik di sekitar Kaldera Toba seperti di Gunung Pusuk Buhit dan Gunung Pardepur.

Toba volcano is one of the ancient volcanoes in Indonesia located in Northern Sumatera. There were two activities having an affect on the volcano, the volcanic activity from the magma chamber beneath the Toba caldera complex and the tectonic activity from the subduction of Indo-Australia Plate. Despite the last eruption of Toba was about 70.000 years ago, the activities were still exist. The 3D seismic tomography could be carried out to understand the conditions beneath Toba Caldera. In this research, the data was processed using the SimulPS12 program, and tomography images obtained were from V_p , V_s , and V_p/V_s ratio. The results showed that the weak zones were found in the depth of 30 km in the middle part of Toba Caldera and the depth of 50 km. The partial melting process was in the depth of about 130 km to 50 km beneath Toba Caldera. The depth of 30 km was also found the high anomaly of V_p and V_s which indicated the existence of the remnant conduit of solidified magma. In addition, the other seismic activities could also be found in its vicinity, i. e., in Pusuk Buhit Volcano and Pardepur Volcano.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Gunung Toba adalah gunung api purba yang menjadi penyebab munculnya Kaldera Toba atau yang banyak dikenal sebagai Danau Toba. Gunung ini terbentuk karena aktivitas vulkanik di bawahnya sekaligus aktivitas lempeng tektonik yang berasal dari penunjaman Lempeng Indo-australia pada Lempeng Eurasia. Oleh sebab itu, Kaldera Toba yang menjadi bukti sejarah adanya Gunung Toba di masa lampau disebut sebagai Kaldera Vulkano-tektonik dan merupakan yang terbesar di dunia. Erupsi Gunung Toba yang terakhir kalinya terjadi sekitar 72.000 tahun yang lalu namun aktivitas vulkanik dan tektonik di bawahnya masih terjadi hingga saat ini. Hal itulah yang menyebabkan Danau Toba menarik untuk diteliti, salah satunya untuk mengetahui keadaan bawah permukaan Danau Toba baik itu dari segi vulkanik ataupun tektoniknya.

Salah satu metode yang dapat diterapkan untuk mengetahui keadaan bawah Danau Toba adalah dengan melakukan tomografi seismik. Menurut *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS), tomografi seismik adalah teknik pencitraan yang menggunakan gelombang seismik yang dihasilkan dari gempa bumi atau letusan untuk membuat citra 3D dari lapisan interior bumi. Pada tomografi seismik digunakan nilai anomali V_p , V_s , dan V_p/V_s untuk mengetahui keadaan bawah permukaan daerah penelitian. Anomali tersebut dapat memberikan interpretasi yang berbeda seperti keberadaan zona lemah, dapur magma, gas, dan interpretasi lainnya yang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya. Pada penelitian sebelumnya, Koulakov dkk. (2016) melakukan serangkaian pengamatan mengenai Danau Toba untuk menjawab hal-hal yang masih menjadi perdebatan di kalangan ahli. Serangkaian pengamatan yang dilakukan tersebut adalah topografi/batimetri, transformasi geoid, distribusi kegunaan, dan tomografi dengan menganalisis kecepatan gelombang S (V_s) yang didapatkan menggunakan perangkat lunak LOTOS. Sebelumnya, pada tahun 2008 Koulakov dkk. (2009) juga melakukan penelitian untuk menentukan nilai V_p , V_s , dan rasio V_p/V_s di Kaldera Toba menggunakan data dari jaringan PASSCAL yang merekam gempa bumi yang terjadi pada rentang Januari – Mei 1995. Selain itu, Jatnika dkk. (2015) juga melakukan penelitian mengenai Kaldera Toba dengan menganalisis data kecepatan gelombang P (V_p) yang didapatkan dari pengolahan data *arrival time* milik BMKG dan jaringan PASSCAL. Tomografi dilakukan menggunakan perangkat lunak *SimulPS12* yang berhasil diterapkan dalam penentuan struktur kecepatan seismik pada keadaan tektonik yang berbeda-beda.

Pada penelitian ini dilakukan tomografi seismik dengan data awal berupa data *travel time* dan posisi hiposenter awal dari penelitian Koulakov dkk. (2016) akan tetapi program yang digunakan adalah program *SimulPS12* yang dikembangkan oleh Evans dkk. (1994) dan analisis dilakukan terhadap anomali kecepatan P (V_p), anomali kecepatan S (V_s), dan V_p/V_s . Pada akhirnya hasil yang didapatkan dari penelitian ini dibandingkan dengan hasil tomografi Koulakov dkk. (2016). Berdasarkan perbedaan program dan variabel yang dianalisis diharapkan dapat memberikan informasi tambahan mengenai keadaan bawah permukaan Danau Toba.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa katalog *travel time* dan hiposenter awal dari penelitian Koulakov dkk. (2016) yang berasal dari gempa bumi yang terjadi pada Januari-Mei 1995 dan Mei-Oktober 2008 di Danau Toba dan sekitarnya. Program yang digunakan untuk pemodelan tomografi 3D adalah *SimulPS12* dengan perangkat lunak pendukung seperti *VELEST* untuk penentuan model kecepatan 1D dan *GMT* untuk *plotting*. Sebelum melakukan tomografi kecepatan seismik 3D, terlebih dahulu dilakukan pembaruan nilai kecepatan 1D.

2.1 Persiapan Data

Pada penelitian ini data yang dibutuhkan berupa katalog *travel time* dan hiposenter dari gempa bumi yang terjadi di daerah penelitian. Katalog data tersebut merupakan hasil *picking* dan penentuan hiposenter awal pada penelitian Koulakov dkk. (2016) yang dapat diakses pada www.ivan-art.com/temp/lotos_toba.zip. Selain itu juga dibutuhkan informasi mengenai posisi stasiun dan model kecepatan awal yang juga dapat diakses pada *website* tersebut.

2.2 Penentuan Model Kecepatan 1D

Penentuan model kecepatan 1D dilakukan menggunakan program *VELEST*. Data yang diperlukan sebagai masukan adalah waktu tempuh gelombang gempa (*travel time*) dan posisi

hiposenter, model kecepatan 1D, dan data posisi stasiun. Format dari seluruh data input tersebut, sebelum diolah menggunakan program *VELEST*, disesuaikan dengan format data yang dapat diproses oleh *VELEST*. Format data tersebut secara rinci dijelaskan pada *Program VELEST User's Guide* (Kissling, 1995).

Pada pengolahan data menggunakan *VELEST* ini juga dilakukan parameterisasi dengan mengatur beberapa parameter yang terdapat pada file *velest.cmn*. Jika semua file sudah diubah kepada format yang dibutuhkan maka dapat dilakukan *running* data menggunakan program *VELEST*. *Output* yang dihasilkan berupa nilai kecepatan 1D yang sudah diperbarui, posisi stasiun dengan koreksi stasiun, posisi hiposenter setelah direlokasi, dan nilai *travel time* yang baru. Tahapan penentuan model kecepatan 1D ini juga dijelaskan pada *Program VELEST User's Guide* (Kissling, 1995).

2.3 Tomografi Kecepatan 3D

Penentuan model kecepatan 3D dilakukan dengan metode inversi tomografi kecepatan seismik menggunakan program *SimulPS12* (Evans dkk., 1994). Adapun input yang dibutuhkan adalah *travel time*, posisi hiposenter, model kecepatan 1D dan lokasi stasiun yang sudah diperbarui yang didapatkan dari hasil pengolahan data pada *VELEST*.

Tahap awal yang dilakukan untuk mendapatkan model kecepatan 3D adalah mempersiapkan data masukan *SimulPS12* berupa *earthq.dat* yang mengandung data *travel time* dan hiposenter, *station.dat* yang mengandung data nama dan posisi stasiun, *velocity.dat* yang mengandung data kecepatan dengan dimensi GridX x (GridY + GridZ), dan *control.dat* yang mengandung parameter kontrol yang akan digunakan saat *running* program *SimulPS12*. Adapun jumlah *grid* pada file *velocity.dat* didapatkan dengan penentuan *grid node* terlebih dahulu. Penentuan *grid* dilakukan berdasarkan persebaran hiposenter, lokasi stasiun, luas area, dan kedalaman penelitian

Setelah semua data yang dibutuhkan diatur sehingga dapat terbaca oleh program, maka dilakukan *running* program *SimulPS12*. Pada salah satu file output, *fort.16*, perlu diperhatikan apakah semua data input berhasil terbaca. Jika ada input yang belum terbaca maka perlu diperhatikan parameter kontrol dan diatur kembali. Jika semua *output* sudah dihasilkan maka dilakukan *plotting* persebaran hiposenter dan perturbasi kecepatan seismik V_p , V_s , dan V_p/V_s menggunakan perangkat lunak GMT.

Pada tahap pemodelan 3D ini, dilakukan Uji resolusi untuk mengetahui kualitas tomografi yang dihasilkan. Uji resolusi yang dilakukan pada penelitian ini adalah *Checkerboard Test* (CKB) atau uji papan catur dan *Diagonal Resolution Element* (DRE). Pada uji CKB, dibuat model kecepatan papan catur yang kemudian diolah menggunakan *SimulPS12* untuk mendapatkan waktu tempuh kalkulasi. Waktu tempuh kalkulasi ini kemudian digunakan untuk melakukan inversi tomografi dengan kecepatan awal. Jika hasil inversi menunjukkan model yang sama dengan model papan catur maka area tersebut teresolusi dengan baik. Adapun uji resolusi DRE dilakukan dengan *plotting* nilai kecepatan DRE yang terdapat pada file keluaran *SimulPS12*. Nilai tersebut berkisar antara 0, yang berarti daerah tersebut tidak teresolusi, hingga 1, yang berarti daerah tersebut teresolusi sempurna.

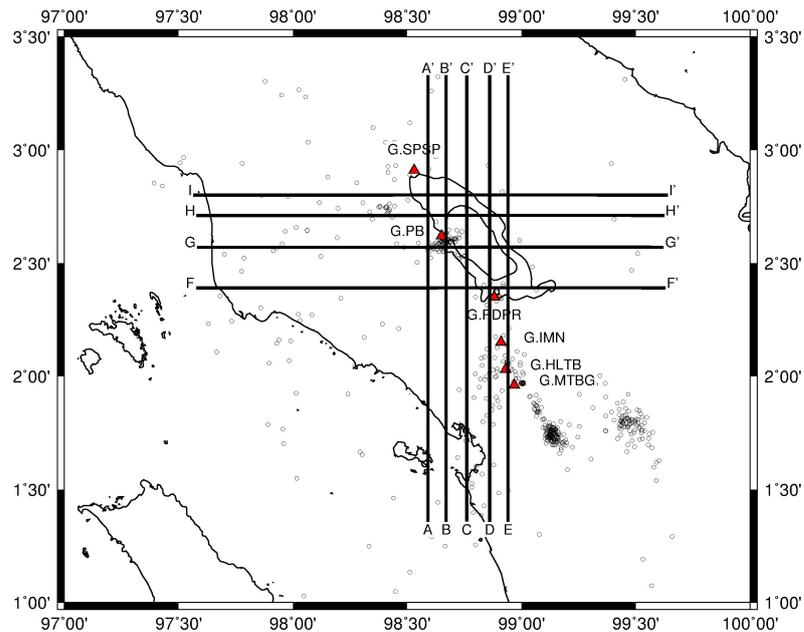
2.4 Interpretasi

Interpretasi hasil pengolahan data dilakukan hanya pada area Danau Toba saja dengan mengamati perturbasi nilai V_p dan V_s terhadap nilai awalnya, dan rasio V_p/V_s . Interpretasi juga didukung oleh informasi awal mengenai keadaan vulkanik ataupun tektonik area tersebut.

III. HASIL DAN DISKUSI

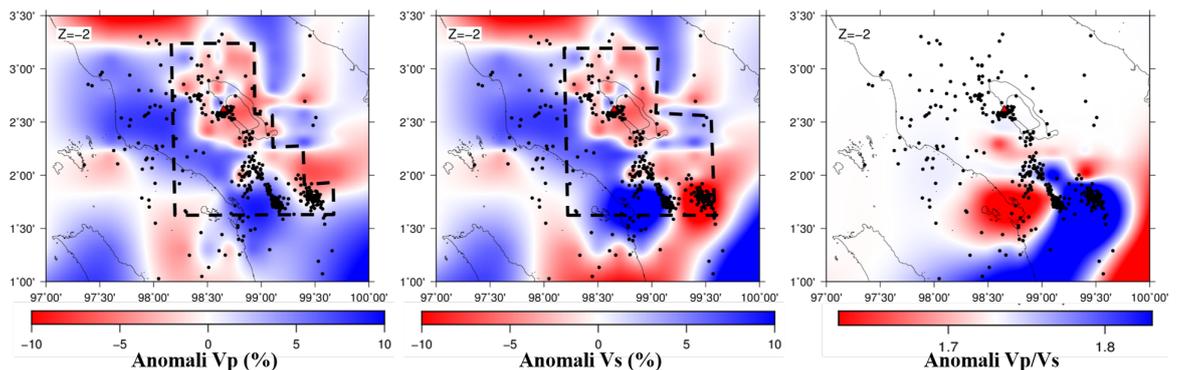
Sebelum melakukan tomografi, terlebih dahulu dilakukan pembaruan model kecepatan 1D. Pada tahapan ini juga didapatkan pembaruan posisi hiposenter yang kedua hal ini digunakan sebagai input pada proses tomografi 3D. Posisi hiposenter yang dihasilkan dari program *VELEST* kembali diperbarui pada tahap tomografi 3D.

Tomografi dilakukan terhadap penampang yang digunakan yaitu secara horizontal terdiri dari lima penampang (Z (kedalaman) = -2 km, 30 km, 50 km, 120 km, dan 200 km) dan secara vertikal terdiri dari sembilan penampang (A, B, C, D, E, F, G, H, I). Posisi penampang ini dapat dilihat pada Gambar 1. Kemudian interpretasi dilakukan pada area dengan hasil resolusi yang baik yaitu pada kedalaman -2 km (2 km di atas permukaan laut) hingga 120 km (120 km di bawah permukaan laut) dan fokus pada lokasi Danau Toba saja.

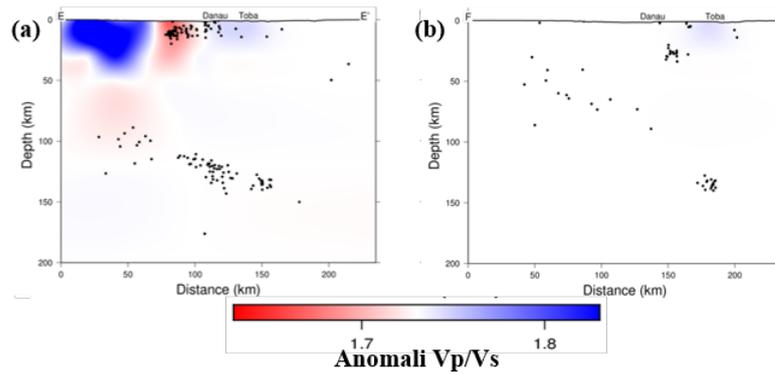


Gambar 1 Tampak atas slice (ket: G.SPSP (Gunung Sipiso-piso), G.PB (Gunung Pusuk Buhit), G.PDPR (Gunung Pardepur), G.IMN (Gunung Imun), G.HLTB (Gunung Helatoba), G.MTBG (Gunung Martimbang))

Penampang hasil tomografi pada kedalaman -2 km ditampilkan pada Gambar 2. Pada kedalaman ini terlihat pola anomali V_p dan V_s negatif di sebagian besar daerah Danau Toba (Anomali 1). Sedangkan pola V_p/V_s daerah Danau Toba yang didapatkan tidak terlalu jelas. Menurut Eberhart-Philips dkk. (1995) hal ini disebabkan, selain faktor kualitas maupun kuantitas data, karena V_p/V_s tergantung pada banyak faktor seperti jenis batuan, porositas, tekanan pori, saturasi fluida, rekahan, kandungan clay, tekanan in-situ, dan jenis fluida. Namun dari penampang vertikal A sampai I, pola anomali V_p/V_s ini dapat terlihat pada beberapa penampang yaitu penampang E dan F. Pada penampang E dan F ini terlihat pola anomali V_p/V_s positif (penampang E dan F dapat dilihat pada Gambar 3). Pola anomali V_p dan V_s negatif dan V_p/V_s positif yang terdapat pada bagian atas kerak bumi mengindikasikan batuan dengan saturasi fluida (Nugraha, 2013).

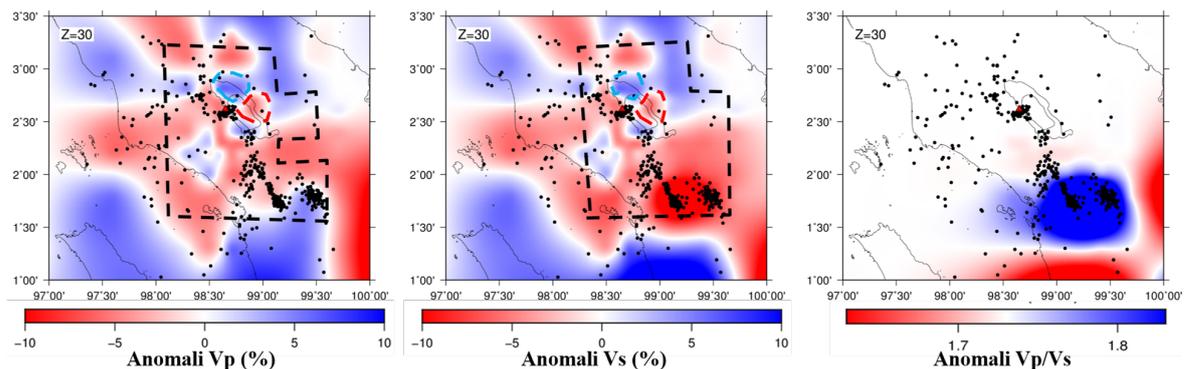


Gambar 2 Hasil tomografi penampang kedalaman -2 km di bawah permukaan laut. Gambar ini secara berurutan dari kiri ke kanan masing-masing menunjukkan pola anomali V_p , V_s , dan V_p/V_s . Garis putus-putus menunjukkan daerah yang teresolusi dengan baik.



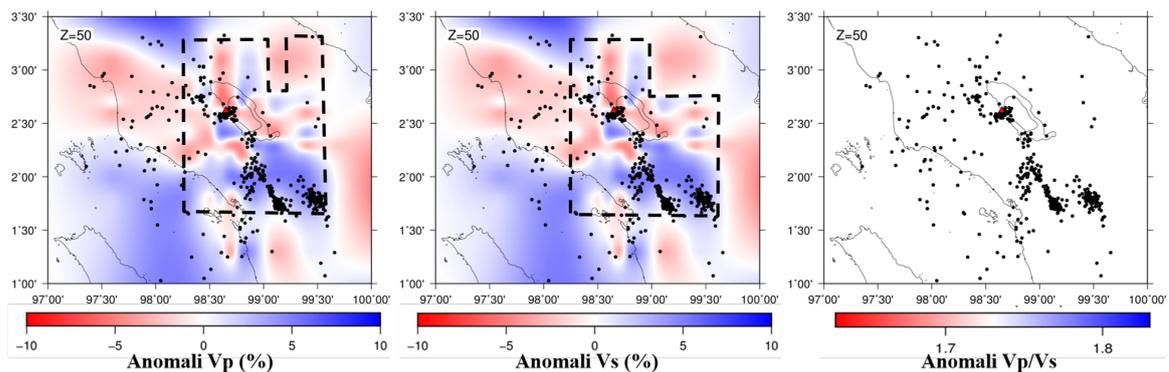
Gambar 3 Hasil tomografi V_p/V_s untuk (a) penampang E dan (b) penampang F

Penampang hasil tomografi kedalaman 30 km ditampilkan pada Gambar 4. Pada kedalaman ini terdapat dua pola anomali yaitu pola anomali V_p dan V_s positif yang ditandai dengan lingkaran berwarna biru (Anomali 2) dan pola anomali V_p dan V_s negatif yang ditandai dengan lingkaran berwarna merah (Anomali 3). Adapun pola anomali V_p/V_s pada kedalaman ini untuk daerah Danau Toba tidak terlihat pada penampang manapun. Pola V_p dan V_s positif yang terdapat pada lapisan kerak yang lebih dalam mengindikasikan adanya bekas konduit dari intrusi magma yang membeku (Sherburn dkk., 2006). Sedangkan pola anomali V_p dan V_s negatif mengindikasikan kehadiran rekahan atau zona lemah yang terdapat fluida bermaterial panas (Indrastuti 2014).



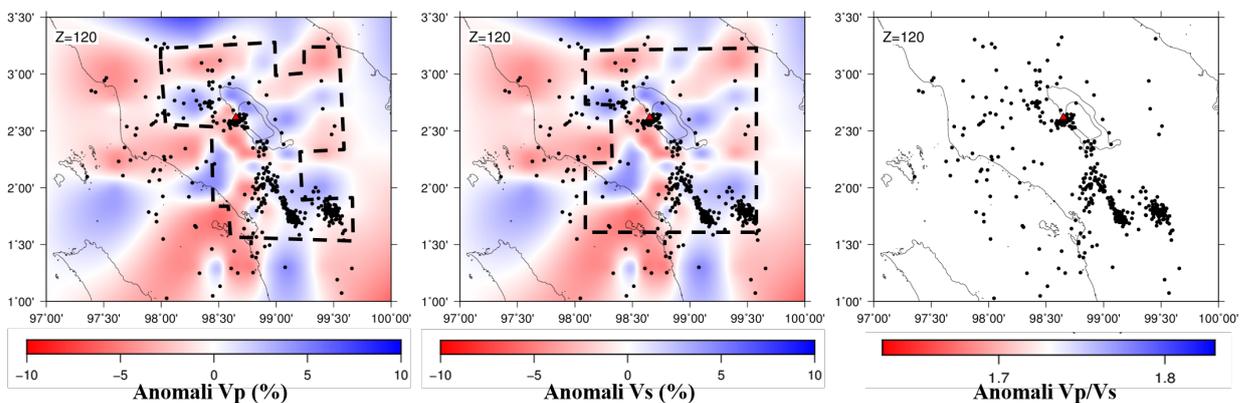
Gambar 4 Hasil tomografi penampang kedalaman 30 km di bawah permukaan laut. Gambar ini secara berurutan dari kiri ke kanan masing-masing menunjukkan pola anomali V_p , V_s , dan V_p/V_s . Garis putus-putus menunjukkan daerah yang teresolusi dengan baik.

Penampang hasil tomografi kedalaman 50 km ditampilkan pada Gambar 5. Pada kedalaman ini terdapat pola anomali V_p dan V_s negatif pada sebagian besar area Danau Toba (Anomali 4). Adapun pola anomali V_p/V_s untuk kedalaman ini pada daerah Danau Toba tidak terlihat pada penampang manapun. Pola anomali V_p dan V_s negatif ini mengindikasikan keberadaan pori berisi lelehan (Nugraha, 2013) atau zona lemah dengan fluida bermaterial panas (Indrastuti, 2014).

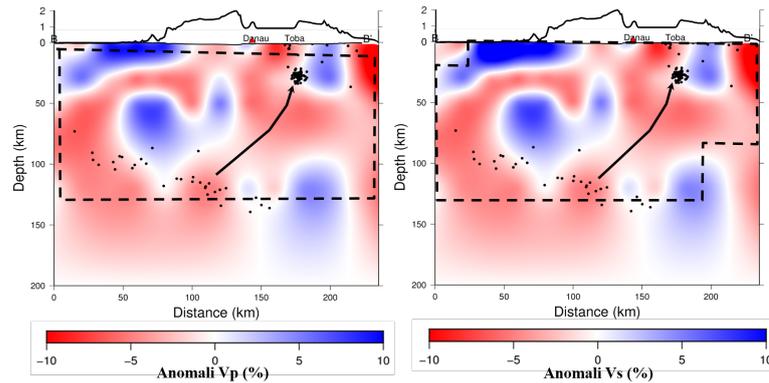


Gambar 5 Hasil tomografi penampang kedalaman 50 km di bawah permukaan laut. Gambar ini secara berurutan dari kiri ke kanan masing-masing menunjukkan pola anomali V_p , V_s , dan V_p/V_s . Garis putus-putus menunjukkan daerah yang teresolusi dengan baik.

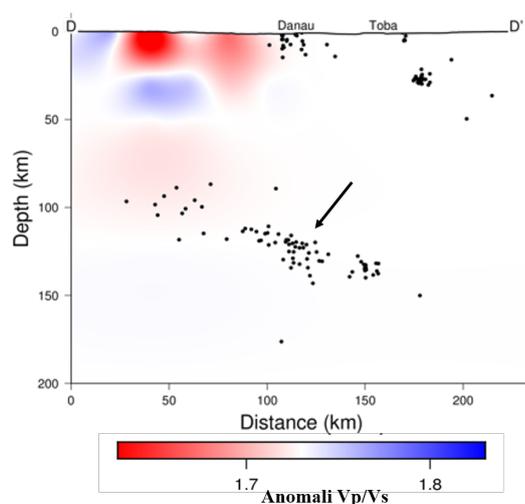
Penampang hasil tomografi kedalaman 120 km ditampilkan pada Gambar 6. Pada kedalaman 120 km di bawah lokasi Danau Toba ini didapati pola anomali V_p dan V_s positif (Anomali 5). Sedangkan pola anomali V_p/V_s untuk kedalaman ini tidak terlihat pada penampang manapun. Anomali V_p dan V_s positif menunjukkan keberadaan material atau batuan yang rigid dan lebih padat dari batuan di sekitarnya. Pada kedalaman ini, anomali V_p dan V_s positif tersebut mengindikasikan bekas konduit lainnya dari intrusi magma yang membeku (Sherburn dkk., 2006). Pada kedalaman ini juga terlihat posisi terjadinya proses *partial melting* yang ditandai dengan pola anomali V_p negatif. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7. Proses *partial melting* tersebut disebabkan oleh slab subduksi yang berasal dari Lempeng Indo-australia. Slab tersebut dapat terlihat dari hiposenter-hiposenter gempa bumi yang mengelompok membentuk arah penunjaman slab pada kedalaman 100 km – 150 km. Hal ini terlihat pada beberapa penampang vertikal salah satunya seperti yang ditunjukkan oleh penampang D yang ditampilkan pada Gambar 8. Adapun pada kedalaman 200 km tidak didapatkan pola anomali V_p , V_s , maupun V_p/V_s untuk daerah Danau Toba.



Gambar 6 Hasil tomografi penampang kedalaman 120 km di bawah permukaan laut. Gambar ini secara berurutan dari kiri ke kanan masing-masing menunjukkan pola anomali V_p , V_s , dan V_p/V_s . Garis putus-putus menunjukkan daerah yang teresolusi dengan baik.



Gambar 7 Hasil tomografi penampang B. Garis putus-putus menunjukkan daerah yang teresolusi dengan baik dan tanda panah menunjukkan posisi *partial melting*



Gambar 8 Hasil tomografi penampang D. Tanda panah menunjukkan posisi slab subduksi

Jika hasil tomografi ini dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yaitu yang dilakukan oleh Koulakov dkk. (2016) terdapat perbedaan pada posisi terjadinya proses *partial melting*. Proses *partial melting* ini berasal dari slab subduksi yang diindikasikan oleh pola anomali V_p dan V_s negatif. Pada penelitian ini anomali tersebut juga terlihat namun pada posisi yang berbeda dari yang didapatkan oleh Koulakov dkk. (2016). Pada penelitian Koulakov dkk. (2016) proses *partial melting* berada tepat di bawah Pulau Samosir pada kedalaman 150 km hingga 50 km yang terlihat pada penampang yang membentang pada posisi sekitar $1.1^{\circ}\text{LU } 98.4^{\circ}\text{BT}$ - $3.1^{\circ}\text{LU } 98.9^{\circ}\text{BT}$. Sedangkan pada penelitian ini proses *partial melting* berada pada kedalaman yang sama di bawah gunung Pusuk Buhit mengarah ke Pulau Samosir (posisi *partial melting* yang didapatkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6). Hal ini dapat dilihat pada penampang B yang membentang pada posisi $1.30^{\circ}\text{LU } 98.67^{\circ}\text{BT}$ - $3.34^{\circ}\text{LU } 98.67^{\circ}\text{BT}$ (posisi penampang B dapat dilihat pada Gambar 1). Perbedaan ini disebabkan karena penampang yang digunakan berada pada posisi yang berbeda. Selain itu grid yang digunakan saat melakukan inversi pun berbeda sehingga memungkinkan posisi anomali untuk sedikit bergeser. Meskipun begitu, keduanya sama-sama menunjukkan proses *partial melting* yang berasal dari slab yang sama yaitu yang berasal dari penunjaman Lempeng Indo-australia pada Lempeng Eurasia.

Berdasarkan hasil tomografi yang didapatkan juga diperkirakan bahwa zona dengan struktur termal tinggi terdapat pada kedalaman 30 km (Gambar 4) dan 50 km (Gambar 5) yang oleh Koulakov dkk (2016) disebut sebagai lokasi terdapatnya dapur magma. Salah satu faktor dari terbentuknya magma disini adalah proses *partial melting* dari aktivitas tektonik slab yang berdasarkan hasil relokasi menunjam pada kedalaman 90 km hingga 150 km di bawah Danau Toba. Jika dilihat dari adanya aktivitas yang terjadi di bawah Danau Toba ini, seperti yang disebutkan oleh Koulakov dkk (2016), bahwa akan terjadi atau tidaknya erupsi Gunung Toba sudah tidak menjadi pertanyaan lagi. Hanya

saja saat ini aktivitas tersebut belum terlihat dan belum menunjukkan dampak berbahaya ke permukaan. Hal ini, salah satunya, disebabkan oleh adanya faktor yang menghalangi aliran pergerakan magma tersebut. Salah satu faktor yang terlihat pada hasil tomografi ini adalah keberadaan bekas konduit dari intrusi magma yang telah membeku yang terdapat pada kedalaman 30 km di bawah Danau Toba.

IV. KESIMPULAN

Hasil tomografi menunjukkan adanya Zona lemah pada bagian bawah Danau Toba yaitu pada kedalaman 30 km dan 50 km di bawah permukaan laut. Selain itu juga terdapat proses *partial melting* pada kedalaman sekitar 130 km yang berasal dari subduksi slab di bawah Danau Toba. Adapun hasil relokasi menggunakan program SimulPS12 menunjukkan posisi episenter yang lebih terkluster. Hal ini lebih memudahkan untuk mengetahui sumber-sumber gempabumi. Pada penelitian ini terlihat sumber-sumber gempabumi tersebut diantaranya Gunung Pusuk Buhit, Gunung Pardepur, Gunung Helatoba, Gunung Martimbang, dan slab subduksi. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil penelitian ini memberikan informasi tambahan mengenai keberadaan anomali positif di kedalaman 30 km di bawah Danau Toba pada bagian utara Danau Toba tersebut. Anomali tersebut diperkirakan berasal dari bekas konduit dari intrusi magma yang sudah membeku. Hal inilah yang diperkirakan menjadi salah satu faktor yang menghalangi aliran fluida panas ke kedalaman yang lebih dangkal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI Bandung yang telah mewadahi dan membimbing penulis sehingga penelitian ini dapat terlaksana, serta semua pihak yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Eberhart-Philips D., Stanley, W.D., Rodriguez, B.D., dan Lutter, W.J., 1995, 'Surface Seismic and Electrical Methods to Detect Fluids Related to Faulting', *Journal of Geophysical research*, pp. 12.919-12.936.
- Evans, J.R., Philips, D.E., dan Thurber, C.H., 1994, *User's Manual for SimulPS12 for Imaging Vp and Vp/Vs: A Derivative of The "Thurber" Tomographic Inversion Simul3 for Local Earthquake and Explosions*, USGS.
- Indrastuti, N., Nugraha, A.D., McCausland, W.A., Hendrasto, M., Gunawan, H., Kusnandar, R., Kasbani, dan Kristianto, 2019, '3-D Seismic Tomography Study of Sinabung Volcano, Northern Sumatera, Indonesia, During The Inter-eruptive Period October 2010 – July 2013', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Jatnika, J., Nugraha, A.D., dan Wandono, 2019, 'Preliminary Result of P-wave Speed Tomography Beneath North Sumatera Region', *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, New York, pp.1-3.
- Kissling, E., 1995, *Program VELEST User's Guide – Short Introduction*, ETH Zuerich, Switzerland.
- Koulakov, I., Kasatkina, E., Shapiro, N.M., Jaupart, C., VasileVsky, A., El-khrepy, A.E., Al-arifi, N., dan Smirnov, S., 2016, 'The Feeder System of The Toba Supervolcano from The Slab to The Shallow Reservoir', *Nature Communications*, pp. 1-12.
- Koulakov, I., Yudistira, T., Luehr, B.G., dan Wandono, 2009, 'P, S Velocity and Vp/Vs Ratio Baneath The Toba Caldera Complex (Northern Sumatera) from Local Earthquake Tomography', *Geophysics Journal International*, pp. 1121-1139.
- Nugraha, A.D., Ohmi, S., Mori, J., Shibutani, T., 2013, 'High Resolution Seismic Velocity Structure Around The Yamasaki Fault Zone of South West Japan as Revealed from Travel-time Tomography', *Earth Planets Space*, pp. 871-881.
- Sherburn, S., White, R.S., Chadwick, M., 2006, 'Three-dimentional Tomographic Imaging of The Taranaki Volcanoes, New Zealand', *Geophysics Journal International*, pp. 957-969.
- IRIS, *Seismic Tomography – Using Earthquakes to Image Earth's Interior*, viewed Mei 2019, <<http://www.iris.edu/hq/inclass/search>>