TANAH GOYANG
JURNAL GEOSAINS
e-ISSN: 3026-3263
Volume 1, Nomor 1 | Mei 2023

Identifikasi Sesar Aktif Menggunakan Metode Tomografi Double Difference di Wilayah Pulau Ambon dan Sekitarnya

Identification of Active Fault Using Double Difference Tomography Method in Ambon Island and Surrounding Region

Arsy Noviyanti S[1*], David Prambudi Sahara[2], Resti Limehuwey[1]

[1] Program Studi Teknik Geofisika Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka Ambon

[2] Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesha No.10, Bandung

***arsynoviyanti11@gmail.com**

Diterima: 19 Februari 2023; Disetujui: 24 April 2023

DOI: 10.30598/tanahgoyang.1.1.52-64

Kata Kunci:
Gempa Ambon
Sesar Aktif
Tomografi *Double Difference*

Abstrak

Maluku memiliki tatanan tektonik yang kompleks karena terletak pada pertemuan tiga lempeng besar yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik-Filipina. Pertemuan ketiga lempeng ini mengakibatkan wilayah Maluku menjadi wilayah yang rawan akan gempa. Salah satu gempa besar yang terjadi di Maluku adalah gempa dengan kekuatan 6,5 Mw pada September 2019. Adanya gempa besar menandakan adanya sesar aktif di wilayah tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai identifikasi sesar aktif di wilayah Pulau Ambon dan sekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk melihat distribusi anomaly Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs untuk mengidentifikasi letak sesar aktif pada wilayah penelitian. Metode tomografi double difference (tomoDD) merupakan metode yang sangat cocok untuk mengidentifikasi sesar aktif. Metode ini memanfaatkan data gempa lokal berupa informasi travel time absolute dan relative untuk menentukan model kecepatan 3D serta lokasi hiposenter. Data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data gempa lokal sebanyak 1502 dengan interval waktu dari 18 Oktober – 15 Desember 2019. Pada hasil distribusi anomaly Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs terdapat sesar aktif pada daerah penelitian dengan arah Utara-Selatan yang ditandai dengan adanya anomaly negatif pada Vp dan Vs, serta anomaly positif pada Rasio Vp/Vs. Sesar ini terdapat berada pada kedalaman 10-15 km pada Kairatu hingga Haruku.

Keywords:
Ambon Earthquake
Active Fault
Double Difference
Tomography

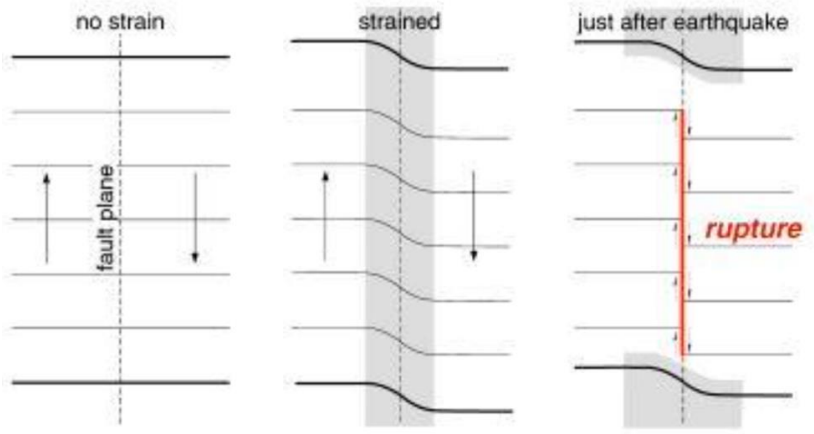
Abstract

Maluku has a complex tectonic setting because it is located at the confluence of three large plates, namely the Eurasian, Indo-Australian and Pacific-Philippine plates, thus resulting in the Maluku region being an area prone to earthquakes. A major earthquake occurred in Maluku with a magnitude of 6.5 Mw in September 2019. The presence of a large earthquake indicates an active fault in the region. Therefore, it is necessary to conduct research on the identification of active faults in Ambon Island and its surroundings. This study aims to look at the distribution of Vp, Vs, and Vp/Vs ratio anomalies to identify the location of active faults in the study area. The double difference tomography (tomoDD) is suitable for identifying active faults, that utilize local earthquake data in the form of absolute and relative travel time information to determine the 3D velocity model and location of the hypocenter. The data used for this study are 1502 local earthquakes. In the results, there are active faults in the study area with a North-South direction marked with a negative anomaly in Vp and Vs, as well as a positive anomaly in the Vp/Vs ratio, at a depth of 10-15 km from Kairatu to Haruku.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki tatanan tektonik kompleks karena berada pada pertemuan 4 lempeng besar yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Filipina (Hall, 2002). Hal ini menimbulkan banyak sesar aktif di Indonesia yang dapat menyebabkan gempa. Indonesia Timur merupakan wilayah tektonik yang sangat aktif (Hamilton, 1979). Salah satu daerah yang rawan akan gempa adalah Maluku karena memiliki aktifitas seismitas yang tinggi, disertai terjadinya periode pengulangan gempa yang sangat singkat (Septiani dan Pujiastuti. 2021).

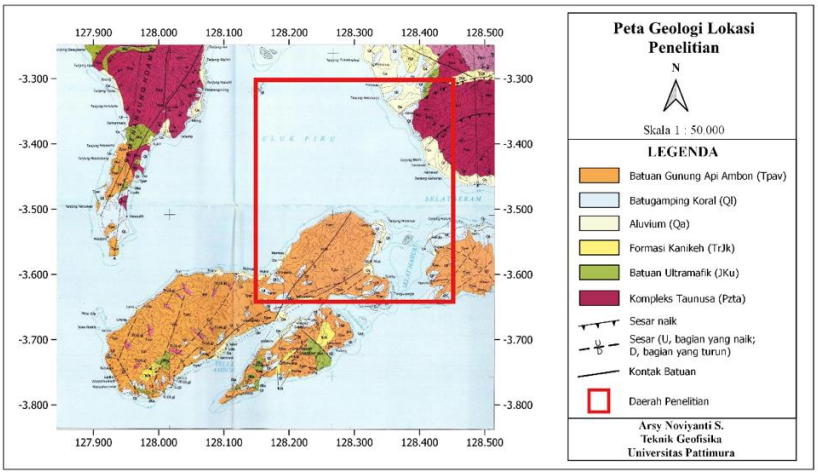
Gempa bumi adalah proses pelepasan energi yang telah terakumulasi beberapa saat. Gempa bumi mengeluarkan gelombang seismik dari dalam bumi dan akan merambat ke permukaan. Umumnya gempa bumi terjadi ketika adanya deformasi. Deformasi terjadi akibat adanya tegangan (*stress*) dan tarikan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan dan tarikan tersebut secara terus-menerus menarik, membengkokkan, dan mematahkan batuan pada lapisan litosfir (Gutenberg dan Richter, 1945). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1 yang menjelaskan mengenai Teori *Elastic Rebound* (Reid, 1910). Teori ini menjelaskan bahwa tekanan akibat gerakan tektonik akan terakumulasi, dan suatu saat akan dilepaskan jika kekuatannya tidak cukup untuk menahan tekanan tersebut. Pada Gambar 1 terlihat bahwa ketika tidak ada tarikan (strain) lapisannya masing sejajar. Ketika adanya tarikan (*strain*) bentuk lapisannya berubah. Tarikan ini terus terjadi sehingga tekanan terus bertambah. Ketika tekanannya sudah lebih besar dari kekuatan pada lapisan, maka akan terjadinya *rupture* yang menghasilkan sesar. Pergerakan secara tiba-tiba inilah yang dikenal sebagai gempa bumi. Lokasi pelepasan gempa di bawah permukaan disebut Hiposenter. Sedangkan proyeksi tegak lurus hiposenter ke permukaan bumi disebut episenter. Hiposenter/fokus gempa bukan hanya suatu titik melainkan suatu bidang karena gempa berasal dari sesar. Sehingga fokus gempa terjadi beberapa km sesuai panjang bidang sesar tersebut.



Gambar 1. Teori Elastic Rebound (Reid, 1910)

Secara koordinat Maluku berada pada 3° 9’ S 129° 23’ E. Disebelah Utara, Pulau Maluku berbatasan dengan Laut Seram, sebelah barat adalah Pulau Sulawesi, sebelah timur adalah Papua dan di sebelah selatan berbatasan dengan Timur Leste serta Laut Arafuru. Penelitian ini hanya berfokus pada wilayah Maluku dengan rentang -3,3° hingga -3,64° pada garis lintang dan 128,15° hingga 128,45° pada garis bujur. Daerah tersebut mencakup sebagian Pulau Ambon, dan sebagian kecil Pulau Seram yang di dalamnya

termasuk daerah Tial, Natsepa, Tulehu, Waai, Liang, Morella, Haruku, Kamarian, dan Kairatu. Daerah penelitian ini memiliki luas 30 km x 40 km (ditandai dengan kotak merah pada Gambar 2). Pada daerah penelitian terdapat beberapa formasi batuan yaitu Ambon *Volcanic Rock* (Tpav), *Coral Limestone* (Ql), *alluvial* (Qa), Formasi Kanikeh (TrJk), Batuan Ultramafik (JKu), dan Kompleks Taunusa (Pzta) yang digambarkan oleh Tjokrosapoetro dkk., 1993. Formasi-formasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta Geologi Daerah Penelitian, dimodifikasi dari Tjokrosapoetro dkk., 1993

Secara geologi Maluku terletak pada pertemuan 3 lempeng yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik-Filipina, dan lempeng Indo-Australia. Letak Maluku yang kompleks menyebabkan wilayah ini memiliki aktivitas tektonik yang cukup aktif. Salah satu gempa yang cukup besar terjadi di Maluku dengan kekuatan 6,5 Mw pada September 2019. Sahara, dkk. (2020) menyatakan bahwa gempa Ambon 2019 terjadi pada sesar berarah *North-South* dengan panjang patahan sekitar 35 km dari Kairatu sampai ke Selat Haruku.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya sesar aktif adalah metode tomografi *double difference*. Metode ini dapat mencitrakan bawah permukaan, dan mengidentifikasi sesar aktif menggunakan informasi *travel time* dari data gempa bumi lokal. *Travel time* yang digunakan adalah *travel time absolute* dan *relative*. Prinsip utama dalam tomografi seismik adalah menyajikan gambaran bawah permukaan bumi dalam domain kecepatan (Shelawisata, 2018). Metode tomografi *double difference* dapat merelokasi sejumlah besar gempa secara akurat serta mengkarakterisasi struktur kecepatan lokal secara halus karena menggunakan data *travel time absolute* dan *relative* (Zhang dan Turber, 2003). Metode ini merupakan pengurangan dua *event* gempa dengan asumsi bahwa kedua *event* ini saling berdekatan sehingga *raypath* dari *event* ke stasiun yang sama hampir identik. Dengan begitu selisih *travel time* antara kedua *event* gempa yang terekam pada satu stasiun yang sama dapat diasumsi sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Hal ini membuat tomoDD lebih baik daripada tomografi standar yang hiposenternya masih tersebar.

Persamaan umum tomografi digambarkan pada persamaan (1), dimana *travel time* (T) dari *event* i ke stasiun k menggunakan teori sinar sebagai integral *raypath*nya (Zhang dan Thuber, 2003). τ^i merupakan *origin time event* i, u merupakan slowness dan ds merupakan panjang *raypath*. Karena hubungan antara hiposenter dan *travel time* tidak linear maka digunakan deret Taylor pada persamaan (1) ini.

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u\, ds. \qquad (1)$$

Lineritas ini menghubungkan ketidaksesuaian antara yang diamati dan perkiraan *travel time* (r_k^i) ke pertubasi yang diinginkan untuk parameter hiposenter (Δx^i) dan kecepatan:

$$r_k^i = \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta\tau^i + \int_i^k \delta u \, ds. \quad (2)$$

Dari persamaan (2) kami dapat mengurangkan *event* j ke stasiun k, maka diperoleh persamaan (3).

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta\tau^i + \int_i^k \delta u \, ds - \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j + \Delta\tau^j - \int_j^k \delta u \, ds. \quad (3)$$

Dengan mengasumsi bahwa kedua *event* ini saling berdekatan sehingga *raypath* dari *event* ke stasiun yang sama hampir identik maka persamaan (3) dapat disederhanakan menjadi persamaan (4).

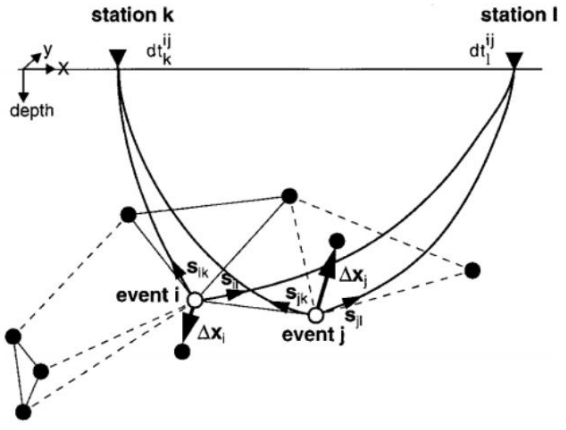
$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta\tau^i - \sum_{l=1}^{3} \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j + \Delta\tau^j . \quad (4)$$

Dimana dr_k^{ij} adalah *double difference* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000). Ini merupakan perbedaan antara waktu kedatangan diferensial yang diamati (T^{obs}) dan dihitung (T^{cal}) untuk dua peristiwa atau dapat ditulis juga dalam persamaan (5).

$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j = \left(T_k^i - T_k^j\right)^{obs} - \left(T_k^i - T_k^j\right)^{cal}. \quad (5)$$

Perbedaan kedua waktu ini dapat dihitung dari Teknik WCC (wave cross correlation) untuk bentuk gelombang yang sama dan *travel time* katalog absolut.

Ilustrasi persamaan (5) dapat dilihat pada Gambar 3. Lingkaran hitam dan putih adalah penyebaran hiposenter. Hiposenter ditentukan menggunakan teknik WCC (*wave cross correlation*) yang ditandai dengan garis tegas dan juga data katalog yang ditandai dengan garis putus-putus. *Event* gempa i dan j ditunjukkan dengan lingkaran putih yang terekam pada stasiun (k dan l) dengan selisih *travel time* dt_k^{ij} dan dt_l^{ij}. Jarak antara kedua *event* jauh lebih kecil daripada jarak dari kl sehingga *raypath*nya diasumsikan sama. Vektor relokasi gempa bumi ditunjukkan oleh arah panah Δxi dan Δyi (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).



Gambar 3. Ilustrasi Relokasi Hiposenter Gempabumi dengan *Double Difference* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000)

Penelitian ini menggunakan Uji resolusi *derivative weighted sum* (DWS) dilakukan untuk melihat kerapatan sinar atau *ray density*. DWS merupakan banyaknya *raypath* yang melewati wilayah (*grid node*) tertentu (Rais. 2019). Semakin banyak gelombang yang melewati *grid node* tersebut, semakin rapat sinar gelombangnya sehingga akan memperoleh hasil inversi dengan resolusi yang baik. DWS biasanya disajikan dalam skala *logarithmic* karena nilainya cukup besar.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini berfokus pada wilayah Pulau Ambon dan sekitarnya dengan rentang -3,3° hingga -3,64° pada garis lintang dan 128,15° hingga 128,45° pada garis bujur. Daerah tersebut mencakup sebagian Pulau Ambon, dan sebagian kecil Pulau Seram yang di dalamnya termasuk daerah Tial, Natsepa, Tulehu, Waai, Liang, Morella, Haruku, Kamarian, dan Kairatu. Daerah penelitian ini memiliki luas 30 km x 40 km. Data yang digunakan untuk penelitian ini adalah data gempa lokal yang bersumber dari seismometer yang dipasang oleh tim ITB, BNPB, BMKG, UNPATTI, BPDP, dan TNI. Terdapat 1502 data gempa dengan interval waktu dari 18 Oktober – 15 Desember 2019.

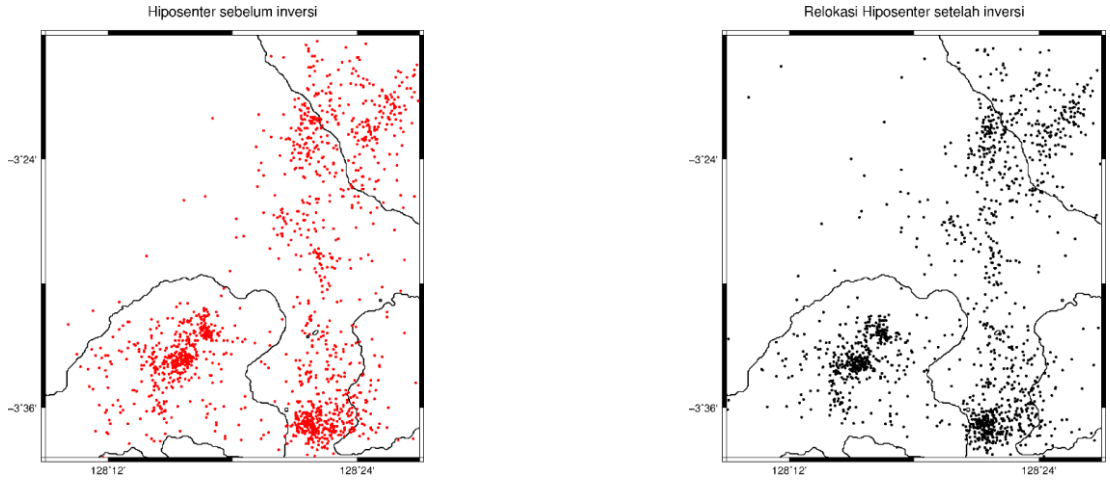
Pada tahap pengolahan data, peneliti menggunakan beberapa *software* seperti Excel, Qqis, Notepad++, Matlab, GMT, dan Qt-tomoDD. Penelitian ini menggunakan metode analisis data kuantitatif dan kualitatif. Metode analisis data kuantitatif dilakukan dengan mengolah data gempa berupa *travel time absolute* dan *relative* kemudian dibuatkan pemodelan struktur kecepatan bawah permukaan menggunakan Qt-tomoDD. Hasil pemodelan tersebut dapat dianalisis menggunakan metode kualitatif dengan melihat pola dan warna yang telah dihasilkan untuk mengidentifikasi sesar aktif di wilayah Pulau Ambon dan sekitarnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada proses pengolahan data menggunakan Qt-tomoDD diperoleh hasil relokasi hiposenter, dan penampang 3D *anomaly* Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs.

a. Relokasi Hiposenter

Penelitian ini merelokasi hiposenter bersama-sama dengan update kecepatan setiap iterasi. Hasil relokasi hiposenter dapat dilihat pada Gambar 4b, sedangkan hiposenter sebelum relokasi dapat dilihat pada Gambar 4a. Terlihat pada Gambar 4b bahwa setelah direlokasi penyebaran hiposenter lebih berkumpul dan memanjang dari arah Utara-Selatan yang menandakan adanya sesar di daerah tersebut. Sedangkan pada bagian utara hiposenter masih tersebar. Kemudian pada bagian selatan terlihat bawah hiposenter cenderung berkumpul pada satu titik. Hal ini menandakan bahwa batuan di bagian utara lebih kompak dibandingkan dengan batuan di bagian selatan.



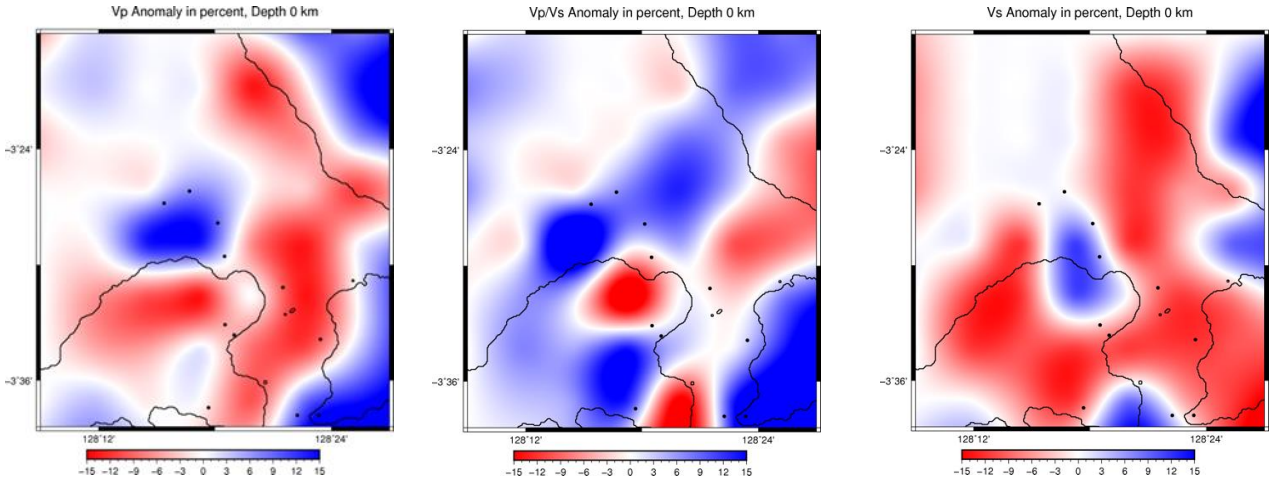
(a) (b)

Gambar 4. Penyebaran Hiposenter sebelum dan sesudah direlokasi

b. Horizontal Slice Hasil Anomaly Vp, Vs, dan Vp/Vs (%)

Penelitian ini menghasilkan *anomaly* Vp, Vs, dan Vp/Vs dari hasil inversi tomografi *double difference* menggunakan *software* Qt-tomoDD. Hasil yang diperoleh adalah nilai longitude, latitude, kedalaman, Vp, dan Vs. Penulis menyajikan *anomaly* Vp, Vs, dan Vp/Vs dalam persen. Anomali kecepatan negatif menandakan bahwa kecepatan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan daerah tersebut, sedangkan *anomaly* positif menandakan bahwa kecepatan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan kecepatan di daerah penelitian. *Anomaly* Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs disajikan berdasarkan kedalaman yaitu kedalaman 0, 5, 10, 15, dan 20 km.

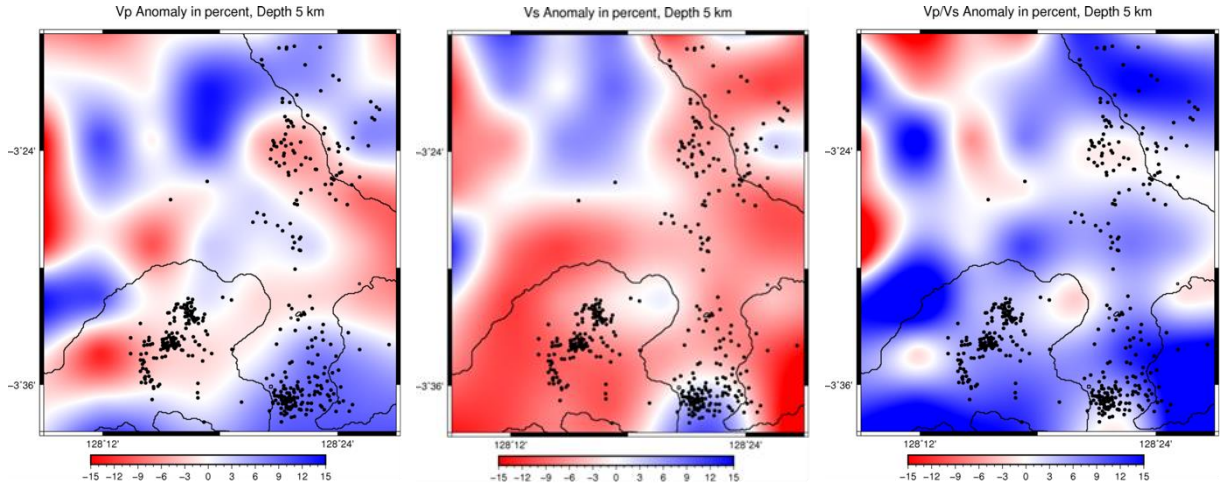
Pada kedalaman 0 km, terdapat *Anomaly* negatif Vp dan Vs di sepanjang hiposenter. Anomali kecepatan negatif menunjukkan bahwa kecepatan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan daerah tersebut. Sedangkan *Anomaly* Vp/Vs pada kedalaman 0 km terlihat cenderung positif di bagian Kairatu, Tulehu dan Haruku serta bernilai negatif di bagian Liang dan Tial. Hal ini menandakan pada kedalaman ini daerah Liang dan Tial terdiri dari batuan sedimen, sedangkan pada Kairatu, Tulehu, dan Haruku terdiri dari batuan yang keras yaitu batuan vulkanik dan metamorf. Hal ini didukung dengan Peta Geologi Lembar Ambon oleh Tjokosapoetro, dkk pada tahun 1993 yang mengatakan bahwa terdapat batuan sedimen berupa batugamping Koral (Ql) dengan umur Holosen dan adanya endapan aluvium di Liang dan Tial; batuan vulkanik pada daerah Haruku dan Tulehu; dan batuan metamorf di Kairatu. Dapat dilihat pada gambar di bawah, *anomaly* Vp tertera pada Gambar 5a, *anomaly* Vs tertera pada Gambar 5b, dan *anomaly* rasio Vp/Vs tertera pada Gambar 5c.



(a) (b) (c)

Gambar 5. *Anomaly* Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs pada kedalaman 0 km dalam %

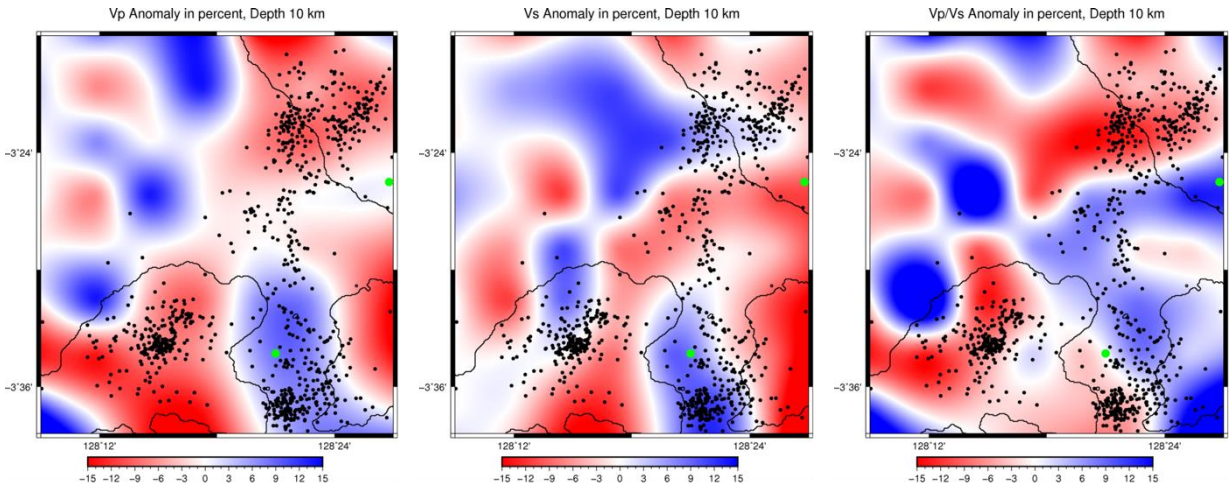
Pada kedalaman 5 km, Anomali Vp sudah mulai terdistribusi antara negatif dan positif. *Anomaly* Vp positif terdapat pada daerah Kairatu, Tulehu, dan Haruku. *Anomaly* Vs sangat negatif tersebar di daerah penelitian. *Anomaly* Vp/Vs pada kedalaman 5 km cenderung positif, tetapi terdapat *anomaly* negatif pada daerah Liang. Hasil *anomaly* Vp, Vs, dan Vp/Vs menunjukan bahwa batuan penyusun Pulau Ambon dan Haruku merupakan batuan vulkanik tetapi ada beberapa daerah yang terdapat endapan aluvium. Hal ini didukung oleh Pownall, dkk pada tahun 2014 bahwa secara geologi permukaan Pulau Ambon dan Haruku disusun oleh batuan vulkanik dan endapan aluvium. Sedangkan pulau Seram tersusun dari batuan metamorf akibat konsekuensi dari tumbukan lempeng Eurasia dan Australia (Kurniawan, dkk. 2021). Dapat dilihat pada gambar di bawah, *Anomaly* Vp tertera pada Gambar 6a, *Anomaly* Vs tertera pada Gambar 6b, dan *anomaly* rasio Vp/Vs tertera pada Gambar 6c.



(a) (b) (c)

Gambar 6. *Anomaly* Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs pada kedalaman 5 km dalam %

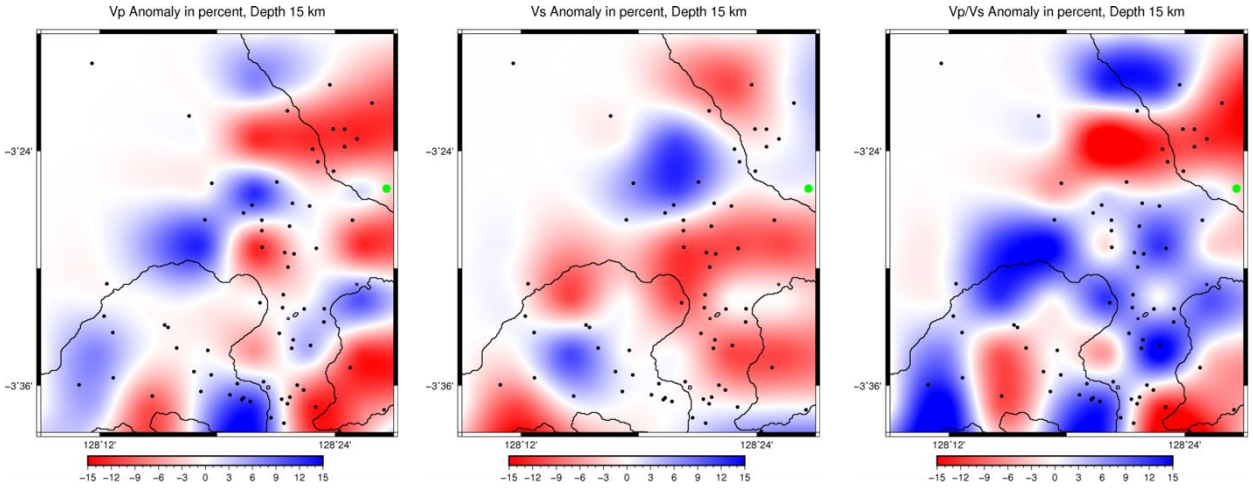
Pada kedalaman 10 km, Anomali Vp dan Vs bernilai negatif dari arah Timur Laut-Baratdaya yaitu pada daerah Kairatu, Liang, Tulehu, dan Haruku. Sedangkan *anomaly* positif terdapat di bagian Selatan yaitu Selat Haruku. Kedua hal tersebut menandakan pada kedalaman ini merupakan low zone dan terdapat patahan karena terdapat kontas *anomaly* dengan lapisan diatasnya dimana penyusun batuan Pulau Ambon, Seram dan Haruku adalah batuan yang keras yaitu batuan vulkanik dan batuan metamorf tetapi pada kedalaman ini terjadi penurunan *anomaly* Vp dan Vs. Kemudian *anomaly* Vp/Vs pada kedalaman 10 km terlihat cenderung negatif di dekat hiposenter. Sedangkan terdapat *anomaly* positif berarah Utara-Selatan yang menandakan adanya patahan. Berdasarkan *anomaly* pada kedalaman 10 km terdapat sesar aktif pada daerah penelitian dengan arah Utara-Selatan ditandai dengan adanya *anomaly* negatif pada Vp dan Vs serta *anomaly* positif pada Rasio Vp/Vs. Hal ini didukung dengan adanya kesejajaran hiposenter yang cenderung berkumpul dengan arah Utara-Selatan. Dapat dilihat pada gambar di bawah, sesar ditandai dengan garis putus-putus berwarna kuning. Lingkaran berwarna merah merupakan aftershock sedangkan lingkaran berwarna hijau merupakan mainshock. *Anomaly* Vp tertera pada Gambar 7a, *Anomaly* Vs tertera pada Gambar 7b, dan *anomaly* rasio Vp/Vs tertera pada Gambar 7c.



(a) (b) (c)

Gambar 7. *Anomaly* Vp, Vs, Rasio Vp/Vs pada kedalaman 10 km dalam %

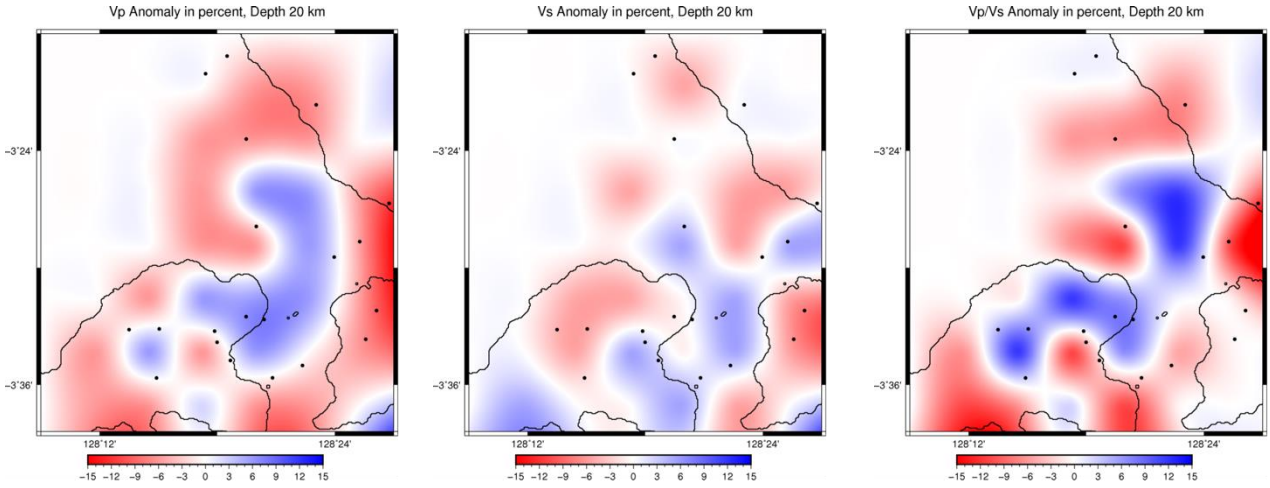
Pada kedalaman 15 km, Anomali Vp cenderung negatif disepanjang daerah yang teresolusi baik yaitu berarah Utara-Selatan dan bernilai positif di daerah Kairatu, Tulehu dan Tial. Sedangkan *anomaly* Vs bernilai sangat negatif. Kedua hal tersebut menandakan Masih ada zona lemah (patahan) tetapi sudah diikuti oleh batuan yang keras karena semakin dalam, batuan akan semakin keras. *Anomaly* Vp/Vs pada kedalaman 15 km terlihat cenderung positif dengan arah Utara-Selatan, hal ini menandakan adanya patahan/sesar. Berdasarkan *anomaly* pada kedalaman 15 km terdapat sesar aktif pada daerah penelitian dengan arah Utara-Selatan ditandai dengan adanya *anomaly* negatif pada Vp dan Vs serta *anomaly* positif pada Rasio Vp/Vs. Dapat dilihat pada gambar di bawah, sesar ditandai dengan garis putus-putus berwarna kuning. Lingkaran hitam merupakan aftershock, sedangkan lingkaran hijau merupakan mainshock. *Anomaly* Vp tertera pada Gambar 8a, *Anomaly* Vs tertera pada Gambar 8b, dan *anomaly* rasio Vp/Vs tertera pada Gambar 8c.



(a) (b) (c)

Gambar 8. *Anomaly* Vp, Vs, Rasio Vp/Vs pada kedalaman 15 km dalam %

Pada kedalaman 20 km, Anomali Vp dan Vs sudah condong bernilai positif dari arah Utara-Selatan. Kedua hal tersebut menandakan semakin dalam lapisan, Vp dan Vs akan semakin besar. Dapat dilihat pada gambar di bawah, *Anomaly* Vp tertera pada Gambar 9a, *Anomaly* Vs tertera pada Gambar 9b, dan *anomaly* rasio Vp/Vs tertera pada Gambar 9c.



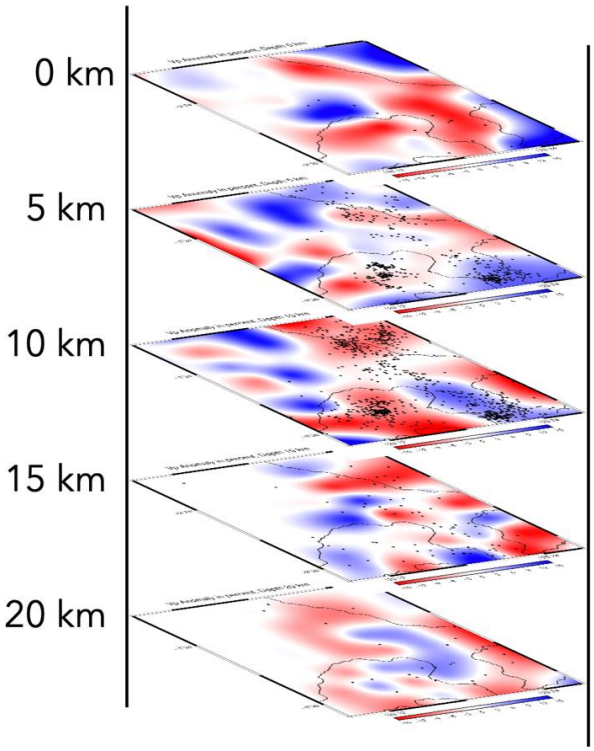
(a) (b) (c)

Gambar 9. *Anomaly* Vp, Vs, Rasio Vp/Vs pada kedalaman 20 km dalam %

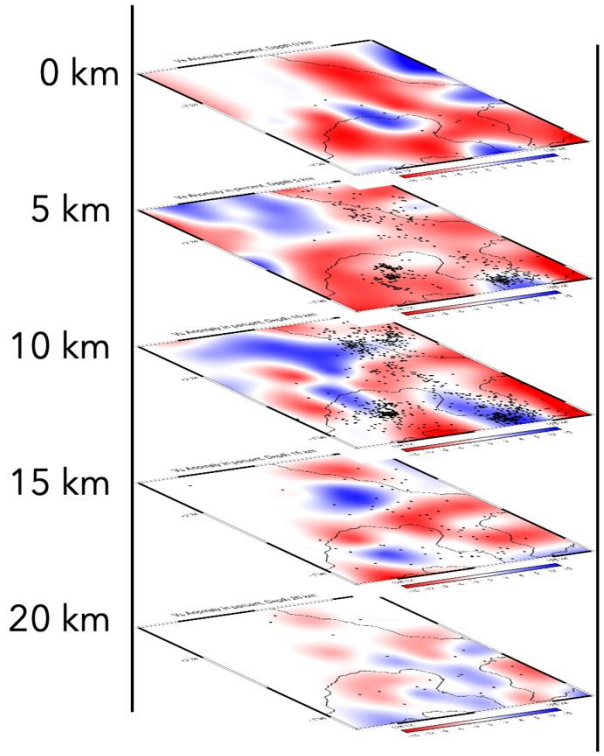
C. Overlay Hasil Anomaly Vp, Vs, dan Vp/Vs (%)

Pada overlay *anomaly* Vp, Vs, dan Rasio Vp/Vs yang berturut-turut ditunjukan pada Gambar 10, 11, dan 12 terlihat bahwa kedalaman 0-5 km mendukung Peta Geologi Lembar Ambon oleh Tjokosapoetro, dkk pada tahun 1993 yang mengatakan bahwa terdapat batuan sedimen berupa batugamping Koral (Ql) dengan umur Holosen dan adanya endapan aluvium di Liang dan Tial; batuan vulkanik pada daerah Haruku dan Tulehu; dan batuan metamorf di Kairatu. Adapun pendukung lain yaitu penelitian dari Pownall, dkk pada tahun 2014 yang menyatakan bahwa secara geologi permukaan Pulau Ambon dan Haruku disusun oleh batuan vulkanik dan endapan aluvium. Sedangkan pulau Seram tersusun dari batuan metamorf akibat konsekuensi dari tumbukan lempeng Eurasia dan Australia (Kurniawan, dkk. 2021). Hal ini ditunjukkan dengan adanya *anomaly* negatif Vp, Vs, dan Vp/Vs yang menunjukkan adanya batuan sedimen di daerah

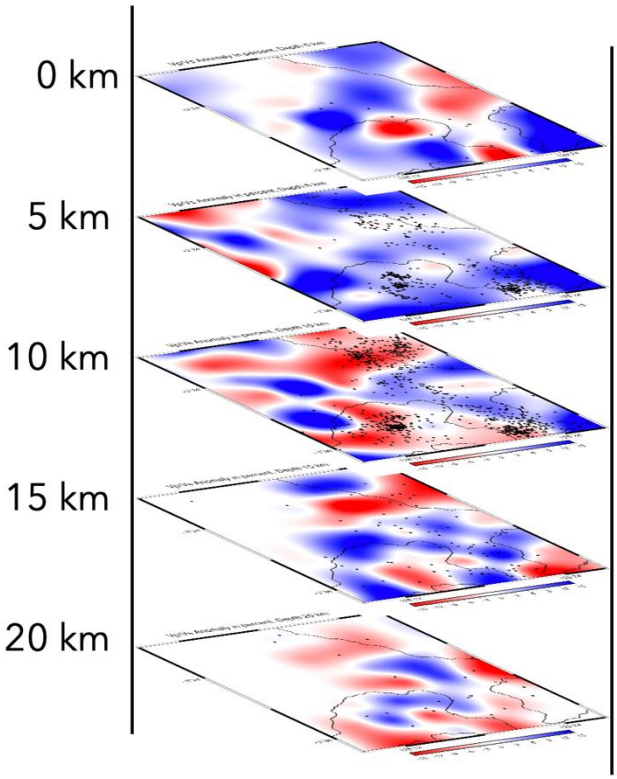
Liang serta *anomaly* positif di daerah Kairatu, Haruku, dan Tulehu. Hal ini yang menyebabkan pada saat gempa 26 September 2019, Liang menjadi daerah yang mengalami banyak kerusakan bahkan terjadinya likuifaksi. Kemudian pada daerah Tulehu dan Haruku terdapat manifestasi berupa mata air panas yang menandakan daerah tersebut tersusun dari batuan vulkanik.



Gambar 10. *Overlay Anomaly* Vp dalam % pada setiap kedalaman



Gambar 11. *Overlay Anomaly* Vs dalam % pada setiap kedalaman



Gambar 12. *Overlay Anomaly* Rasio Vp/Vs dalam % pada setiap kedalaman

Pada kedalaman 10-15 km terjadi penurunan *anomaly* Vp dan Vs, hal tersebut menandakan pada kedalaman ini merupakan low zone dan terdapat patahan karena bertentangan dengan lapisan diatasnya dimana penyusun batuan Pulau Ambon, Seram dan Haruku adalah batuan yang keras yaitu batuan vulkanik dan batuan metamorf. Kemudian terdapat *anomaly* Vp/Vs positif berarah Utara-Selatan diikuti dengan adanya kesejajaran hiposenter yang cenderung berkumpul dengan arah Utara-Selatan. Pada kedalaman ini terdapat banyak gempa aftershock dan memiliki resolusi yang sangat tinggi. Sehingga sesar diduga berada pada kedalaman 10-15 km dengan arah Utara-Selatan. Sedangkan pada kedalaman 20, *anomaly* Vp dan Vs sudah kembali positif karena semakin bertambah kedalaman lapisan makan semakin tinggi kecepatannya.

Hasil dan pembahasan merupakan inti dari penelitian, dimana pada bagian ini berisi hasil yang diambil dari analisis data atau hasil uji hipotesis. Diskusi memainkan peran penting dalam sebuah artikel ilmiah. Bagian ini menjawab permasalahan, menginterpretasikan hasil penelitian dan temuan menjadi pengetahuan yang telah diketahui, menegaskan dan/atau kontras dengan penelitian-peneliti lain, mengkonstruksi teori baru, dan/atau memodifikasi teori sebelumnya. Pembahasan juga harus memuat implikasi hasil teoritis dan implementasi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

a) Relokasi menggunakan metode *tomografi double difference* menghasilkan penyebaran hiposenter yang lebih akurat dilihat dari nilai residual *travel time* setelah inversi menggunakan tomografi *double difference* yang mendekati nol dibandingkan nilai residual *travel time* sebelum inversi. Relokasi hiposenter menunjukan penyebaran hiposenter cenderung berkumpul, sehingga diindikasikan terdapat sesar aktif pada daerah penelitian.
b) Metode *tomografi double difference* dapat mencitrakan struktur bawah permukaan dengan sangat baik karena memanfaatkan *travel time absolute* dan *relative*. Hasil inversi menggunakan metode tomografi *double difference* menunjukan bahwa pada daerah penelitian terdapat *anomaly* negatif pada Vp dan Vs, serta *anomaly* positif pada Rasio Vp/Vs. Nilai *absolute* Vp dan Vs semakin meningkat seiiring pertambahan kedalaman. Hal ini menandakan bahwa semakin bertambah kedalaman maka semakin keras batuan penyusunnya. Sedangkan nilai *absolute* dari Rasio Vp/Vs cenderung positif dari kedalaman 10-15 km. hal ini menandakan adanya sesar pada daerah penelitian.
c) Terdapat sesar aktif pada daerah penelitian dengan arah Utara-Selatan yang ditandai dengan adanya *anomaly* negatif pada Vp dan Vs, serta *anomaly* positif pada Rasio Vp/Vs. Sesar diduga berada pada kedalaman 10-15 km berarah Utara-Selatan dengan koordinat 128,378° pada garis bujur. Sesar ini terletak di Kairatu hingga Selat Haruku.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada keluarga besar Program Studi Teknik Geofisika Universitas Pattimura serta keluarga besar Laboratorium Vulkanologi dan Panasbumi ITB yang telah memberikan dukungan atas penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Gutenberg, B. dan Richter, C. F. (1945). Frequency of earthquakes in California, Nature, 156, 371.

Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of South-East Asia and the South-West Pacific: computer-based reconstructions, model and animations, Journal of Asian Earth Sciences, 20, 353–431.

Hamilton, W. dan Myers, W. B. (1979). Sifat batholit Boulder Montana, geol. Soc. NS, 85, 365–378.

Kurniawan, M. F. R. (2021). Model kecepatan gelombang geser di bawah Pulau Ambon dan sekitarnya berdasarkan Ambient Noise Tomography. Skripsi. Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung.

Kurniawan, M. F. R., Rosalia, S., Nugraha, A. D., Zulfakriza, Sahara, D. P, Muhari, A., Nurdin, A. A., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., Priyono, A., Lesmana, A., Tuakia, M. Z., Elly, E. (2021). Ambient Seismic Noise Cross - correlation of Ambon Island and Surrounding Area, Eastern Indonesia: Preliminary Result, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 873.

Rais, M. I. (2019). Struktur Model Kecepatan Tiga Dimensi Di Sekitar Lengan Utara Sulawesi Menggunakan Tomografi Double Difference. Skripsi. Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Reid, H. (1910). The mechanics of the earthquake, the California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, 2, 16–28.

Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Muhari, A., Rusdin, A. A., Rosalia, S., Priyono, A., Zulfakriza, Z., Widiyantoro, S., Puspito, N. T., Rietbrock, A., Lesmana, A., Kusumawati, D., Ardianto, A., Baskara, A. W., Halauwet, Y., Shiddiqi A. H., Rafie, M. T., Pradisti, R., Mozef, P. W., Tuakia, M. Z., dan Elly, E. (2020). Source mechanism and triggered large aftershock of the Mw 6,5 Ambon, Indonesia earthquake, Tectonophysics, 12.

Septiani, I., Pujiastuti, D. (2021). Analisis Seismisitas Wilayah Kepulauan Maluku Periode 1970-2019 dengan Menggunakan Metode Likelihood, Jurnal Fisika Universitas Andalas, 10.

Shelawisata, H. G. (2018). Pemodelan 3D kecepatan gelombang P dengan metode double difference dan tomografi travel time untuk identifikasi zona patahan (studi kasus: patahan Palu Koro). Skripsi. Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumian, Institut Sepuluh November, Surabaya.

Tjokrosapoetro, S., Rusmana, E., dan Achdan, A. (1993). Peta geologi lembar Ambon.

Waldhauser, F. dan Ellsworth, W.L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America, 90, 1353–1368.

Zhang, H., dan Turber, C. H. (2003). Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 1876-1886.

Zhang, H., dan Turber, C. H. (2003). User's manual for tomoDD1.1 (double-difference tomography) for determining event locations and velocity structure from local earthquakes and explosions, Bulletin of the Seismological Society of America.