PAPER NAME	AUTHOR	
248-1537-1-LE (2).pdf	Ade Stephani Sudiyanto	
WORD COUNT	CHARACTER COUNT	
4628 Words	27637 Characters	
PAGE COUNT	FILE SIZE	
18 Pages	1.3MB	
SUBMISSION DATE	REPORT DATE	
Feb 13, 2023 8:34 AM GMT+7	Feb 13, 2023 8:35 AM GMT+7	

• 13% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 11% Internet database
- Crossref database
- 8% Submitted Works database

Excluded from Similarity Report

• Bibliographic material

• 4% Publications database

Crossref Posted Content database

• Cited material

PERMODELAN STRUKTUR LAPISAN BUMI PROVINSI BENGKULU MENGGUNAKAN TOMOGRAFI SEISMIK WAKTU TUNDA

MODELLING OF THE EARTH LAYER STRUCTURE OF BENGKULU PROVINCE USING TIME DELAY SEISMIC TOMOGRAPH

Ade Stepani Sudiyanto^{1*}, Nurul Hudayat²

¹STIT Trisula Bengkulu; Jl. Moh. Hasan 02 No. 03 Pasar Baru Bengkulu; (0736) 347437 ²Pusat Riser Geospasial; Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong, Bogor, Jawa Barat, Indonesia, 16911; 081110646822

Received: 2022, October 13th Accepted: 2023, January 30th

Keywords:

Bengkulu; LOTOS-12; Mohorovisic; Seismic tomography.

Corespondent Email: adestepanimci@gmail.com

How to cite this article:

Sudiyanto, A.S. & Hudayat, N. (2023). Pemodelan Struktur Lapisan Bumi Provinsi Bengkulu Menggunakan Tomografi Seismik Waktu Tunda. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 09(01), 43-60.

Abstrak. Tomografi seismik merupakan suatu metode yang digunakan untuk memodelkan benda dalam bentuk gambar menggunakan data dari waktu tiba gelombang seismik. Pada penelitian kali ini dilakukan permodelan citra 3D struktur lapisan bumi di bawah Provinsi Bengkulu. Citra yang dihasilkan pada penelitian ini diolah menggunakan program LOTOS-12 dan didapat hasil 4 nomali kecepatan gelombang P dan Gelombang *S* serta citra penampang 3D. Anomali negatif berasal dari Pegunungan Bukit Barisan. Anomali negatif kecepatan terendah berada di bawah gunung api aktif dengan deviasi kecepatan -5% pada kedalaman 25 – 55 km dan ditemukan keberadaan *partial melting* Jerada pada kedalaman 110-130 km. Anomali negatif dengan kecepatan rendah diduga merupakan peningkatan fluida dan pelelehan dari slab subduksi disebabkan Lase transisi. Berdasarkan hasil inversi didapatkan juga adanya peningkatan kecepatan dari kedalaman 25 km menuju 35 km ang diduga merupakan zona transisi kerak menuju mantel atas karena adanya Mohorovisic discontinuity.

Abstract. Seismic tomography is a method used to model objects in the form of images using data from the arrival time of seismic waves. In this research, 3D image modeling of the structure of the earth's layers under Bengkulu Province was carried out. The images produced¹³, this study were processed using the LOTOS-12 program and obtained the results of²⁵-wave and S-wave velocity anomalies as well as 3D cross-sectional images. The negative anomaly originates from the Bukit Barisan Mountains. The lowest velocity negative anomaly is under an active volcano with a velocity deviation of -5%³¹t a depth of 25-55 km and partial melting is found at a depth of 10-130 km. The negative anomaly with low velocity is thought to be an increase in fluid and melting²⁴ of the subducting slab due to the transition phase. Based on the inversion results,¹⁸ was also found that there was an increase in velocity from a depth of 25 km to 3.²¹ km which is thought to be the transition zone of the crust to¹³ he upper mantle due to the Mohorovisic discontinuity.

1. PENDAHULUAN

Provinsi Bengkulu merupakan Provinsi yang terletak di bagian selatan Pulau Sumatera. Provinsi Bengkulu memiliki tingkat keaktifan tektonik²⁸ang tinggi hal ini terlihat pada Gambar 1. Pada gambar terlihat Provinsi Bengkulu memiliki perbatasan langsung engan zona subduksi yang merupakan zona pertemuan antara kedua lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Zona subduksi tersebut mengakibatkan terdapatnya sesar dan bukit barisan di sepanjang Bengkulu. Beberapa kejadian gempabumi pernah terjadi di Bengkulu (Gambar 1) diantaranya tahun 2007 terjadi gempa berskala M7,9 di pantai barat Kota Bengkulu. Sebelumnya pada tahun 2000 juga pernah terjadi gempa berskala M7,3 di dekat Pulau Enggano (Prasetya dan Daryono, 2019). Tidak hanya terjadi di laut, gempa besar juga pernah terjadi di pesisir pantai Bengkulu disekitar daerah Manna dan Kota Bengkulu. Tomografi merupakan metode untuk memodelkan objek dan bentuk suatu gambar. Tomografi menggunakan penjejakan sinar yang dilepas oleh source dan ditangkap receiver.

Prinsip yang digunakan tomografi adalah inversi, melalui inversi model direkonstruksi kembali menjadi model sebenarnya dengan menggunakan parameter model awal oleh Lehmann (2007). Berbagai struktur bawah permukaan bisa dimodelkan dengan menggunakan tomografi seismik seperti struktur patahan, bentuk kedalaman zona subduksi dan struktur kedalaman gunung berapi. Beberapa penelitian pernah dilakukan menggunakan tomografi beberapa diantaranya Koulakov dkk. (2009) pernah melakukan studi di Toba. Hasil yang didapatnya berupa adanya anomali kecepatan rendah disekitar gunung Toba Purba.

Aki dan Lee (1976) yang melakukan penentuan kecepatan anomali dengan menggunakan waktu tiba gempabumi lokal. Studi menunjukkan distribusi kecepatan diatas 5 km sebagai zona kecepatan lemah berhubungan dengan patahan San Andreas.

Widiyantoro (2005) melakukan studi ³⁰omografi dan geodinamika Sumatera yang berimplikasi terhadap mekanisme gempa besar. penelitiannya mencitrakan struktur 3 dimensi Sumatera Gengan menggunakan waktu tiba gelombang P dan gelombang S. Pada penampang horizontal memperlihatkan adanya slab di kerak dan pada penampang vertikal terindikasi adanya slab subduksi yang landai. Studi Koulakov dkk. (2009) pada kedalaman 5 km di bawah gunungapi aktif terlihat ratio Vp/Vs tinggi diduga magmatic Chambers. Pada anomali vertikal terlihat kecepatan rendah gelombang P dan S dan ratio kedalaman 120-140 km di bawah V p/V skaldera yang diduga adanya peningkatan fluida dan pelelehan batuan dari slab subduksi.

Studi yang sama juga pernah dilakukan di Krakatau oleh Jaxybulatov dkk. (2011) dengan menggunakan tomografi gempabumi lokal. Studi memperlihatkan bahwa pada kedalaman 4 km adanya kecepatan rendah gelombang Pdan S serta ditemukan juga ratio Vp/Vs yang menunjukkan adanya pelelehan batuan dengan kandungan material fluida tinggi. Hasil interpretasi yang didapat bahwa pada zona tersebut merupakan *magma chambers*.

Melalui studi²⁷ang sudah ada maka pada penelitian ini akan dilakukan interpretasi struktur bawah permukaan dan membuat model anomali kecepatan gelombang P dan gelombang S lapisan bawah Provinsi Bengkulu dengan model kecepatan awal mengacu pada model kecepatan yang pernah dilakukan Koulakov dkk. (2009) di Toba.



Gambar 1. Sebaran gempa dan lokasi penelitian kotak warna merah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Gelombang seismik berasal dari getaran yang ditimbulkan oleh gempabumi. Sebelum terjadi gempa, pada daerah fokus terjadi stress dan strain yang mengakibatkan adanya akumulasi energi. Semakin lama energi yang terakumulasi akan mengalami perlepasan energi yang semakin besar disebut sebagai Inergi gelombang gempa. Pusat gempa yang disebut fokus, gelombang gempa akan merambat kesegala arah sampai mencapai (Gambar kepermukaan tanah 2) (Prawirodikromo, 2012). Gelombang seismik merupakan gelombang elastik. Senjalaran

gelombang seismik melewati struktur interior bumi sangat bergantung pada sifat elastisitas batuan yang dilewatinya. Teori elastisitas dan deformasi menjelaskan mekanisme maupun sifat fisis gelombang yang dilewati gelombang seismik. Teori elastisitas digunakan ¹⁰. ntuk mencari hubungan parameter elastisitas (*stress* dan *strain*) dengan parameter gelombang. Sedangkan teori deformasi didasarkan pada model *stress* dan *strain*.

Secara umum gelombang gempa ada dua jenis yaitu gelombang badan (*body wave*), selombang yang menjalar di dalam bumi dan gelombang permukaan (*surface waves*) yaitu gelombang yang menjalar pada permukaan bumi. Gelombang badan (*body waves*) yang terdiri dari *Primary wave* dan *Secondary wave*. Sementara itu gelombang permukaan (*Surface waves*) terdiri dari *Rayleigh wave* dan *Love wave*. Gelombang permukaan membawa energi terdiri dari pada gelombang badan. Akan tetapi, gelombang badan ²²nemiliki kecepatan rambat gelombang lebih besar dari pada gelombang permukaan. *P- wave* memiliki cepat rambat paling cepat setelah itu disusul S*wave* terakhir *Surface wave* (Prawirodikromo, 2012).



Gambar 2. Ilustrasi perubahan bentuk pada suatu bujur sangkar ketika dilewati gelombang seismik (modifikasi Afnimar (2009)).

Metode grid search merupakan metode yang mencari lokasi hiposenter dengan menghitung travel time beberapa titik dalam model Havskov dan Ottemoller (2010). Metode grid search memiliki kelemahan karena membutuhkan banyak waktu untuk perhitungannya. Oleh karena itu Koulakov dan Sobolev (2006) mengembangkan metode grid search menggunakan extreme goal function (GF) dalam menentukan lokasi hiposenter. GF membuat beberapa kemungkinan posisi sumber dalam 3D melalui probabilitas pada setiap titik dalam area studi, GF dapat diekpresikan dalam bentuk berikut :

$$G = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{M_l^{N-1}} dt_{ij}^2}{M_l^{N-1}}}$$
(1)

dengan (dt_{ij}) adalah residual pengukuran sumber ke-*i* pada stasiun ke-*j* dan M_i^{N-1} merupakan jumlah hasil pengamatan yang baik yaitu nilai residual dibawah batas maksimum. Pencarian dimulai dari titik tengah jaringan stasiun penerima atau posisi stasiun dengan waktu tempuh terpendek atau dengan residual terkecil.

Hukum *Snellius* digunakan untuk menjelaskan sinar seismik yang mengalami refraksi dan refleksi saat merambat melalui lapisan batuan dibawah permukaan bumi. Sebagaimana diketahui hukum Snellius ditulis dengan persamaan.

$$\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2}$$
(2)

dengan i_1 adalah sudut datang melewati medium pertama, i_2 adalah sudut datang

melalui medium kedua atau sudut pantul, \mathcal{P}_1 adalah kecepatan gelombang medium pertama dan v_2 adalah kecepatan gelombang medium kedua (Bormann dkk., 2002).

Tomografi seismik waktu tunda merupakan selisih waktu tempuh gelombang dari sumber ke-*i* ke stasiun penerima ke-*j* yang merambat dalam medium dengan kecepatan yang bervariasi yang relatif terhadap model kecepatan acuan. Model kecepatan acuan gelombang seismik biasanya radial berlapis (Wandono, 2007).

Persamaan waktu tunda pada parameterisasi model diperlihatkan dalam bentuk diskrit dimana penjalaran gelombang dilakukan tiap elemen blok seperti pada G**ambar 3**.

Pada G**ambar 3** terdapat lima *raypath* yang melewati medium tiap element blok (elemen blok pada gambar ada 9). Masing-masing elemen blok dilewati dengan panjang sinar yang berbeda dan kecepatan tiap medium berbeda. Sehingga waktu tempuh dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta t_j = \sum_{i=1}^n \Delta u(s)_1 dl_{ij} \tag{3}$$

Jika semua sinar gelombang diuraikan dalam tiap elemen blok maka akan menjadi sebuah persamaan linier sebagai berikut:

$$\Delta t_{1} = \Delta u(s)_{1} dl_{11} + \Delta u(s)_{2} dl_{21} + \dots + \Delta u(s)_{n} dl_{n1},$$
(4)

$$\Delta t_{2} = \Delta u(s)_{2} dl_{12} + \Delta u(s)_{2} dl_{22} + \dots + \Delta u(s)_{n} dl_{n2},$$
(5)

$$\Delta t_j = \Delta u(s)_j dl_{1j} + \Delta u(s)_j dl_{2j} + \dots + \Delta u(s)_n dl_{nj}.$$
(6)

÷

Dalam bentuk matriks ditulis [D] = [G].[M]

$$\begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \vdots \\ \Delta t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dl_{11} & \cdots & dl_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ dl_{1j} & \cdots & dl_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(s)_1 \\ \vdots \\ \Delta u(s)_n \end{bmatrix}.$$
(7)

Berdasarkan persamaan 7 matriks sebelah kiri merupakan data [D], matriks setelahnya adalah Matriks Kernel [G] dan matriks paling kanan merupakan parameter yang dicari. Matriks kernel berisi panjang sinar dalam elemen blok dengan *i* adalah ²³olok ke *i* dan *j* adalah sinar seismik ke *j*.



Gambar 3. Lima *raypath* pada 9 *cell* model Jones (2010).

Penelusuran jejak sinar (*ray tracing*) adalah berkas sinar seismik yang melalui medium dari sumber ke penerima. *Ray tracing* bisa digunakan untuk menentukan jejak seismik dan mengukur panjang segmen sinar gelombang seismik.

Penelusuran jejak sinar seismik menggunakan algoritma *pseudo bending*. Algoritma ini menggunakan prinsip Fermat dimana jejak sinar seismik yang menjalar dalam medium dari sumber ke penerima memerlukan waktu tercepat (Koulakov, 2012).

3. METODE PENELITIAN

²⁰ata yang digunakan merupakan data gempa tektonik yang terjadi di Provinsi Bengkulu dan sekitarnya selama periode Mei 2006 sampai Mei 2013 yang ²⁰idapatkan dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kepahiang dan *International Sesmological Center* (ISC) dalam bentuk digital dan berformat *miniseed*. Gempa yang terjadi direkam pada 39 stasiun yang tersebar disekeliling daerah penelitian. Beberapa hal yang perlu diketahui dalam penelitian yaitu pertama menentukan model kecepatan awal 1D, parameterisasi dan melakukan uji resolusi sintetik (Koulakov, 2012).

2. Model kecepatan awal 1D digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan model kecepatan sebenarnya. Selanjutnya penentukan grid dan model struktur awal perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Parameterisasi dalam inversi tomografi ditunjukkan pada basis metode parameterisasi node. Beberapa node tersebar menurut densitas sinar dengan jarak node dibuat sama dengan panjang sinar. Untuk mengurangi efek distribusi node maka beberapa grid dibuat pada orientasi yang berbeda. Hasil dari setiap orientasi digabung menjadi sebuah kesimpulan untuk menghasilkan solusi yang smooth.

Penelitian ini menggunakan ukuran grid yaitu 5x5x5 km³ dengan 4 orientasi grid yang berbeda yaitu 0°, 22°, 45° dan 67°. Uji resolusi sintetik digunakan untuk menguji keakuratan sekelompok data tomografi dengan menghitung densitas sinar seismik yang melewati blok volume. Perkiraan resolusi dapat ditunjukkan dengan metoda checkerboard. Prosedur metoda checkerboard diawali dengan melakukan inversi dimana data observasi digantikan dengan menggunakan sekelompok data sintetik yang dihitung dari model kecepatan 3D khusus. Model kecepatan checkerboard dibentuk dengan menambahkan gangguan kecepatan. Kemudian data sintetik diinversi dan dicocokkan dengan membandingkan hasil inversi cheackerboard.

Proses pengolahan data pada penelitian menggunakan LOTOS (Local *Tomografi Software*) 12 dirancang untuk melakukan inversi secara bersamaan guna menentukan struktur gelombang P dan Gelombang S dan koordinat sumber (*latitude*, *longitude* dan *depth*) (Koulakov, 2012). Perhitungan dimulai dengan menggunakan dua data *file* berupa koordinat stasiun, *avel time* gelombang P dan gelombang S dari gempa bumi lokal yang diterima stasiun. Informasi tambahan seperti kecepatan model dan parameter pendukung dibutuhkan untuk perhitungan inversi.

Penyelesaian tomografi pada LOTOS menghasilkan optimisasi kecepatan 1D dan inversi tomografi 3D. Struktur *file* dalam *root* directory LOTOS diperkenalkan pada Tabel 1. Sebelum mengeksekusi program perlu mendefinisikan area yang akan dieksekusi. Pengaturan pendefinisian program tersimpan all areas.dat dan model.dat. pada *file* Penulisan area pada file all areas.dat mengikuti nama area spasi lalu dituliskan model observasi, spasi lalu jumlah iterasi seperti penulisan "KEPHYANG MODEL_01 3". Sama halnya dengan intruksi diatas penulisan *file model.dat* juga diatur dengan beberapa baris yaitu baris pertama berkas area, baris kedua model observasi, baris ketiga dan keempat berisi jumlah iterasi global dan lokal.

Tabel 1. Folder dan File dalam directory (Koulakov, 2012).

Data	Folder berisi data dan model	
Common	Folder yang berisi informasi mengenai warna, garis pantai, batas tepi, dan lain-lain.	
Programs	Folder yang memperlihatkan inversi tomografi	
All_area.dat	File yang mendefinisikan area dan model untuk proses inversi	
Model.dat	File yang berisi mengenai informasi model	
Start.bat	File untuk menjalankan program	

Setelah semuanya diatur maka proses eksekusi dilakukan pada *file START.BAT.* Hasil yang didapat dari program LOTOS berupa model kecepatan real 1D dan citra anomali 3D. Kontur anomali 3D yang didapat dipetakan kembali menggunakan GMT (1998) untuk diidentifikasi. Dibutuhkan juga data geologi sebagai validasi keberadaan segmen sesar (Sieh dan Natawidjaja, 2000) dan data *slab* (Hayes dkk. 2012).

🥺 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan data tahun 2006 sampai 2013 yang berasal dari BMKG dan ISC. Berdasarkan hasil eksekusi LOTOS terdapat 1123 kejadian gempa yang diterima 30 stasiun dengan banyaknya sinar gelombang-P dan gelombang-S yang dipicking masing-masing sekitar 6392 dan 2353. Hasil citra tomografi LOTOS-12 dipresentasikan menjadi dua irisan yaitu irisan horizontal dan vertikal. Setiap drisan akan menampilkan sinar gelombang dengan cakupan sinar yang bervariasi.

Cakupan sinar sangat mempengaruhi resolusi tomogram daerah penelitian. Pada irisan horizontal cakupan sinar studi tomografi daerah Bengkulu beresolusi baik pada kedalaman 2-7 km. Cakupan sinar ini banyak terlihat di daerah sekitar gunung berapi. Pada kedalaman 22-27 km, juga terlihat cakupan sinar resolusi baik yang mana cakupan sinar ini berasal dari aktivitas tektonik yang terjadi di daerah Bengkulu. Gambar 4 memperlihatkan citra penampang horizontal gelombang P dan gelombang S pada salah satu orientasi grid untuk kedalaman 2-7 km dan 22–27 km.





Gambar 4. Cakupan sinar gelombang gempa (titik-titik warna hitam) z = 2-7 km. Gelombang P (kiri) (Gambar 4a) dan gelombang S (kanan) (Gambar 4b), Cakupan sinar gelombang gempa (titik-titik warna hitam) z = 17 - 22 km. Gelombang P (kiri) (Gambar 4c) dan gelombang S (kanan) (Gambar 4d).

Cakupan sinar digunakan untuk menentukan parameterisasi node. Node sendiri terdistribusi dalam penelitian ini berhubungan dengan kepadatan sinar. Spasi node yang digunakan pada penelitian yaitu 5x5x5 km³ sesuai dengan kepadatan sinar yang didapat memiliki jarak minimum 5 km. Node berhubungan dengan grid tetrahedral dengan kecepatan linier. Untuk mengurangi efek distribusi node yang tidak merata karena tidak adanya data, maka orientasi yang digunakan memiliki orientasi yang berbeda yaitu 0°, 22°,

45° dan 67°. Uji resolusi sintetik digunakan untuk mengestimasi kebenaran solusi dari hasil inversi tomgrafi (Wandono, 2007). Perkiraan resolusi diperlihatkan dengan metode checkerboard. Pada penelitian ini dilakukan uji resolusi checkerboard yang dimulai dengan melakukan inversi tomografi model observasi diganti dengan model sintetik. Model sintetik di inversi dan solusi dicocokkan dengan membandingkan hasil inversi dengan checkerboard (Gambar 5).





Gambar 5. Uji Resolusi Sintetik (*Checkerboard Test*) Gelombang-P pada kedalaman² km, 5 km, 15 km, 25 km dan 35 km. Model real sebelah kanan model sintetik sebelah kiri. Gambal² varna biru menunjukkan anomali positif dan gambar warna merah menunjukkan anomali negatif.

Pada Gambar 5 dan 6 terlihat distribusi densitas sinar seismik yang cukup baik antara model *real* dan model sintetik. Warna putih pada data *real* menunjukkan resolusi yang tidak baik karena daerah tersebut tidak dilalui sinar seismik. Hasil uji resolusi sintetik pada gelombang *P* dan gelombang-*S* terlihat cukup baik pada area 1 km sampai 35 km. Hasil uji sintetik ini menggunakan ukuran grid 5x5x5km³ hasil inversi tomografinya teresolusi baik sampai kedalaman 35 km dengan ukuran papan catur 40x40 km².





Gambar 6. Uji Resolusi Sintetik (*Checkerboard Test*) Gelombang-S pada kedalaman⁹ km, 5 km, 15 km, 25 km dan 35 km. Model real sebelah kanan model sintetik sebelah kiri. Gamba¹² arna biru menunjukkan anomali positif dan gambar warna merah menunjukkan anomali negatif.

Model awal yang digunakan pada penelitian ini adalah model kecepatan 1D yang pernah digunakan di Toba (Koulakov dkk., 2009). pada Seperti terlihat Gambar 7 memperlihatkan model awal kecepatan 1D (garis abu-abu) dan model hasil optimalisasi (garis biru model 1D Vp dan garis merah model 1D Vs). Pada Gambar 7 terlihat trend garis berwarna abu abu, serta biru dan merah memiliki besar kecepatan yang hampir sama. Adanya kesamaan trend menunjukkan selisih nilai reduksi yang kecil dengan RMSE 0.3.

Nilai RMSE ini cukup bagus berdasarkan penelitian Dinc dkk. (2010) untuk model awal kecepatan 1D nilai RSME <1. Peningkatan kecepatan terlihat pada kedalaman sekitar 30-50 km. Peningkatan kecepatan ini diduga karena sinar melewati batas *mohorovisic discontinuity*. Sesuai dengan dengan hasil peningkatan kecepatan dari Dzakiya dan Sismanto (2017) yang menyebutkan adanya batuan basal dengan densitas lebih dari 3 g/cm³ pada kedalaman 25 km diidentifikasi sebagai mantel.



Gambar 7. Hasil Optimalisasi Model 1D Castribusi Kecepatan Gelombang-P dan gelombang-S. Garis abuabu starting model, garis biru dan merah adalah hasil

akhirnya.

Struktur Recepatan gelombang P dan S di wilayah Bengkulu dapat dilihat dalam penampang horizontal struktur 2D (Gambar 8 dan Gambar 9). Deviasi anomali kecepatan dinyatakan dalam persen (-5% sampai dengan 5%) dari kecepatan model dengan ditunjukkan warna merah dipresentasikan sebagai anomali dengan kecepatan rendah dan warna biru dipresentasikan sebagai anomali kecepatan tinggi. Warna putih pada gambar merupakan daerah yang tidak dilalui sinar sehingga nilai kecepatannya tidak ada. Hal ini dikarenakan tidak meratanya distribusi gempa dan stasiun. Citra dibuat dengan kedalaman Km, 5 km, 15 km, 25 km, 35 km, 45 km, 55 km, dan 65 km.

Terlihat adanya anomali negatif disepanjang Bukit Barisan. Anomali negatif

dari gelombang P (Gambar 8a, 8b dan 8c) diinterpretasikan sebagai Sesar Besar Sumatera yang terletak memanjang dari baratlaut ke tenggara yang melalui wilayah Bengkulu dan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Tidak hanya terlihat disepanjang bukit barisan anomali negatif juga terlihat di pantai barat daerah penelitian (Gambar 8d dan 8e). Anomali negatif mengelilingi anomali positif yg memiliki kecepatan tinggi. Diduga pada daerah daerah yang memiliki anomali positif ini terdapat lipatan berupa sesar Mentawai (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Sesar yang terjadi pada daerah ini timbul akibat adanya pergerakan ³²empeng Indo-Australia yang terus menabrak Lempeng Eurasia.





Gambar 8. Citra anomali kecepatan gelombang-P pada lapisan kerak bumi dan *mantle* bagian atas pada kedalaman 13 m, 5 km, 15 km, 25 km, 35 km, 45 km, 55 km dan 65 km. Anomali kecepatan gelombang-P dinyatakan dalam persen. Segitiga warna merah merupakan gunung api aktif dan segitiga warna biru merupakan gunung api.

Terlihat pada G**ambar 9** adanya anomali negatif kecepatan gelombang *S* dibagian timur daerah penelitian. Anomali negatif ini terlihat jelas sampai kedalaman 65 km. Anomali negatif ini berhubungan langsung dengan adanya Pegunungan Bukit Barisan yang memanjang hampir diseluruh bagian daerah penelitian. Pada kedalaman 5 km sampai 65 km ditemukan adanya blok anomali negatif yang cukup besar disekitar gunung bukit Kaba dan gunung Dempo. Anomali negatif ini mulai berkurang seiring bertambahnya kedalaman. Anomali negatif pada gelombang-S biasa identik dengan fluida cair yang terdapat didalamnya berasal dari *partial melting.* Anomali negatif terlihat dominan di bawah Gunung Dempo yang diinterpretasikan adanya kantong magma. Nilai anomali negatif kecepatan gelombang-S pada Dempo sekitar 4 sampai 5 persen berada pada kedalaman sampai 15-65 km. Citra anomali gelombang pada penampang vertikal memperlihatkan struktur bawah permukaan kearah radial. Untuk mengetahui struktur kecepatan secara vertikal perlu dibuat sayatan.





Gambar 9. Citra anomali kecepatan gelombang-S pada lapisan kerak bumi dan mantle bagian atas pada kedalaman 13 m, 5 km, 15 km, 25 km, 35 km, 45 km, 55 km dan 65 km. Anomali kecepatan gelombang-S dinyatakan dalam persen. Segitiga warna merah merupakan gunung api aktif dan segitiga warna biru merupakan gunung api.

Pada penelitian ini dibuat sayatan yang memotong Sesar Besar Sumatera dan Gunung di daerah penelitian yaitu Gunung Dempo (Gambar 10), Gunung Kaba (Gambar 11), Gunung Bukit Daun (Gambar 12) dan Gunung Sumbing (Gunung Sumbing). Sayatan dibuat memanjang dari barat ke timur dengan panjang sayatan 420 km dan dibuat tegak lurus dengan sesar dan zona subduksi serta memotong gunungapi. Berdasarkan citra vertikal terlihat zona partial melting terlihat berasal dari kedalaman 120 km tepat di bawah gunung api. Pada Gambar 10 anomali negatif terlihat dominan di bawah Gunung Dempo diinterpretasikan yang adanya kantong

magma. Nilai anomali negatif kecepatan gelombang-S pada Gunung Dempo sekitar 4 sampai 5 persen pada kedalaman 20 - 40 km. Keberadaan anomali negatif kecepatan rendah pada Gambar 10 terlihat sampai kedalaman 120 km. Anomali kecepatan rendah juga terlihat pada jarak sayatan 180 kecepatan gelombang-P. Anomali yang diduga terjadi karena gesekan yang kuat antara lempeng dan benua lempeng samudera ini menghasilkan sesar mentawai. Pada gunung Dempo terlihat anomali kecepatan rendah yang besar dengan \sqrt{p} =7.35 km/s dan Vs = 4.19 km/s).



Gambar 10. Penampang Vertikal anomali kecapatan gelombang-P dan gelombang-S Gunung Dempo. Segitiga warna merah merupakan Gunung Dempo, titik warna hitam merupakan sesar Mentawai dan sesar sumatera serta garis melengkung warna biru merupakan trend slab subduksi.





Gambar 11. Penampang Vertikal anomali kecapatan gelombang-P dan gelombang-S Gunung Kaba. Segitiga warna merah merupakan Gunung Kaba, titik warna hitam merupakan sesar Mentawai dan sesar sumatera serta garis melengkung warna biru merupakan trend slab subduksi.

Berdasarkan citra Anomali Vp dan Vs terlihat juga adanya zona partial melting di Gunung Kaba. Zona partial melting ini berada pada kedalaman 60 - 70 km. Fluida yang meleleh pada daerah tersebut terintrusi naik menuju gunungapi akibat adanya sesar disekitarnya. Struktur bawah permukaan Gunung Kaba sangat terlihat jelas adanya anomali negatif pada kecepatan gelombang-P sampai kedalaman sekitar 120 km. Anomali negatif ini diduga merupakan Zona Benioff yang menjadi tempat pelehan batuan (partial melting). Anomali negatif juga terlihat pada kedalaman 70 km yang mengintrusi naik ke bawah permukaan Kaba melalui batuan berpori. Anomali ini diduga fluida yang menerobos batuan berpori yang diakibatkan adanya sesar disekitarnya. Pada citra anomali vertikal terlihat adanya dua anomali negatif pada kecepatan gelombang-P yang mencapai permukaan. Hal ini berkaitan dengan terdapatnya dua buah segmen sesar yang berada disekitar Gunung Bukit Kaba.

Pada Gunung Bukit Daun (Gambar 12) adanya anomali negatif terlihat jelas pada kedalaman 60–70 km yang diperkirakan merupakan daerah migrasi magma dari slab menunjam ke lempeng benua. Material *partial melting* lunak dan tidak *rigrid*, sehingga kecepatannya menjadi menurun sehingga terlihat sebagai jalur migrasi magma yang berada dibawah Gunung Bukit Daun. Pori pori batuan yang diakibatkan oleh patahan Sesar Besar Sumatera menjadi celah fluida magma bermigrasi. Pada jarak sayatan 300–360 km pada kedalaman 60 km terlihat adanya anomali negatif dengan simpangan kecepatan dalam -4% sampai -5%.

Pada Gunung Sumbing (Gambar 13) terlihat adanya anomali negatif dibawah gunung sumbing sampai kedalaman lebih dari 120 km. Anomali ini tidak terlihat jelas di kedalaman dangkal karena distribusi sinar yang kurang. Secara umum hasil penelitian ini berkesesuaian dengan penelitian sebelumnya, yakni rendahnya nilai *Vp* dan *Vs* di bawah pegunung bukit barisan (Lestari dan Nugraha, 2015).





Gambar 12. Penampang Vertikal anomali kecapatan gelombang-P dan gelombang-S Gunung Bukit Daun. Segitiga warna biru merupakan Gunung Bukit Daun titik warna hitam merupakan sesar Mentawai dan sesar Sumatera (dari kiri ke kanan). Garis melengkung warna biru merupakan trend slab subduksi.





Gambar 13. Penampang Vertikal anomali kecapatan gelombang-P dan gelombang-S Gunung Sumbing. Segitiga warna merah merupakan gunung Sumbing titik warna hitam merupakan sesar mentawai dan sesar besar sumatera (dari kiri ke kanan). Garis melengkung warna biru merupakan trend slab subduksi.

5. KESIMPULAN

Pada penelitian ini dapat dilihat beberapa citra yang menggambarkan anomali negatif struktur bawah permukaan yaitu:

- a. Terlihatnya anomali negatif pada kedalaman 35 km sampai kedalaman 45 km yang diduga berupa sesar mentawai yang memanjang dibagian barat Bengkulu.
- b. Terlihatnya anomali negatif pada kedalaman 15 km sampai kedalaman 65 km disekitar Gunung Dempo, Gunung Bukit Kaba, Gunung Bukit Daun dan Gunung Sumbing yang diduga adanya fluida kental berupa material panas.
- c. Pada citra anomali 3D adanya variasi kecepatan gelombang-P dan gelombang-S disekitar bawah pegunungan bukit barisan yang cenderung memiliki anomali negatif dan terlihat juga adanya anomali positif disekitar pesisir pantai Bengkulu. Anomali negatif terlihat dominan di sebelah utara Gunung Dempo dengan deviasi kecepatan 5%. Selain itu terdapat juga area partial melting pada kedalaman antara 110-130 km dicirikan dengan adanya anomali negatif. Selain itu anomali negatif gelombang-P juga terlihat pada Gunung Kaba yang mencapai permukaan hal ini diduga adanya dua sesar yang memotong.
- d. Pada kedalaman 25 km terdapat peningkatan kecepatan yang diduga sebagai zona transisi kerak menuju *mantle* atas

berupa batas diskontuinitas sampai kedalaman 65 km.

🥴 CAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua, kepala stasiun geofisika kepahiang dan rekan-rekan ⁶ang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Afnimar. (2009). Seismologi. ITB PRESS.

- Aki, K., & Lee, W. H. K. (1976). Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model. *Journal of Geophysical Research*, *81*(23), 4381–4399. https://doi.org/10.1029/JB081I023P04381
- Bormann, P., Engdahl, B., Kind, R., Baumbach, M., Bock, G., Grosser, H., Choy, G. L., & Boatwright, J. (2002). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). 1(2002), 1–18. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP
- Dinc, A. N., Koulakov, I., Thorwart, M., Rabbel, W., Flueh, E. R., Arroyo, I., Taylor, W., & Alvarado, G. (2010). Local earthquake tomography of central Costa Rica: Transition from seamount to ridge subduction. *Geophysical Journal International*, *183*(1), 286–302. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04717.x

- Dzakiya, N., & Sismanto. (2017). Pemodelan Tiga Dimensi (3D) Lapisan Bawah Permukaan Bumi di Subcekungan Jambi pada Lapangan "Zuhro" Berdasarkan Analisis Data Anomali Gravitasi. *Bimipa*, *24*(3), 268–280.
- Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8697-6
- Hayes, G. P., Wald, D. J., & Johnson, R. L. (2012). Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, *117*(B1).

https://doi.org/10.1029/2011JB008524

- Jaxybulatov, K., Koulakov, I., Seht, M. I. von, Klinge, K., Reichert, C., Dahren, B., & Troll, V. R. (2011). Evidence for high fluid/melt content beneath Krakatau volcano (Indonesia) from local earthquake tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206(3–4), 96–105. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.06. 009
- Jones, I. F. (2010). Tutorial: Velocity estimation via ray-based tomography. *First Break*, *28*(2), 45–52. https://doi.org/10.3997/1365-2397.2010006
- Koulakov, I. (2012). Code LOTOS-12 for 3D tomographic inversion based on passive seismic data from local and regional events Table of content: 1–59.
- Koulakov, I., & Sobolev, S. V. (2006). A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region. *Geophysical Journal International*, *164*(2), 425–440. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x

- Koulakov, I., Yudistira, T., Luehr, B. G., dan Wandono. (2009). P, S velocity and VP/VS ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography. *Geophysical Journal International*, *177*(3), 1121–1139. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04114.x
- Lehmann, B. (2007). Seismic traveltime tomography for engineering and exploration applications. European Association of Geoscientists & amp; Engineers. https://www.earthdoc.org/content/books/9

789462820166

- Lestari, T., & Nugraha, A. D. (2015). *Imaging* of 3-D seismic velocity structure of Southern Sumatra region using double difference tomographic method. 030014. https://doi.org/10.1063/1.4915022
- Prasetya, T. & Daryono. (2019). *KATALOG GEMPABUMI* SIGNIFIKAN DAN MERUSAK 1821 - 2018. BMKG.
- Prawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*. Pustaka Pelajar.
- PUSGEN. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung.
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *105*(B12), 28295–28326. https://doi.org/10.1029/2000JB900120
- Wandono. (2007). *Studi Tomografi Seismik Non-Linier Lokal untuk Kompleks Kaldera Toba dan Sekitarnya*. Institut Teknologi Bandung.
- Widiyantoro, S. (2005). Tomografi dan Geodinamika Sumatera – Implikasi terhadap Mekanisme Gempa Besar. *Joint Convention Surabaya*.

13% Overall Similarity Top sources found in the following databases: 4% Publications database 11% Internet database Crossref database Crossref Posted Content database 8% Submitted Works database **TOP SOURCES** The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed. etd.repository.ugm.ac.id 2% Internet ejournal.unesa.ac.id 1% 2 Internet Harold S. Johnston. "Use of Excess Carbon 14 Data to Calibrate Model... <1% 3 Crossref Sriwijaya University on 2021-11-26 4 <1% Submitted works eprints.umm.ac.id 5 <1% Internet 123dok.com 6 <1% Internet repository.its.ac.id 7 <1% Internet slideshare.net 8 <1% Internet

wheretoeatuk.com Internet	<1%
Syiah Kuala University on 2021-12-31 Submitted works	<1%
Sriwijaya University on 2021-02-15 Submitted works	<1%
digilib.unhas.ac.id	<1%
"Geodynamics of the Latin American Pacific Margin", Springer Nature, Crossref	· <1%
(7-13-15) http://202.4.179.132/lihatinformasi2.php?no_urut=2611 Internet	<1%
Ikhsan Pramudya, Abdul Rauf, Asbar Asbar. "ANALISIS KERENTANAN Crossref	[·] <1%
media.neliti.com Internet	<1%
Sultan Agung Islamic University on 2021-02-13 Submitted works	<1%
acikbilim.yok.gov.tr Internet	<1%
id.scribd.com Internet	<1%
repository.ub.ac.id Internet	<1%

John Makario Londoño, Katerine Vallejo, Sleyde Quintero. "Detailed sei <1% Crossref	
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta on 2021-11-29 Submitted works	<1%
adoc.pub Internet	<1%
agupubs.onlinelibrary.wiley.com	<1%
science.gov Internet	<1%
Masayu Rahmia Anwar Putri, Sri Turni Hartati, Fayakun Crossref	Satria. "KEMAT <1%
id.123dok.com Internet	<1%
laksanardie.blogspot.com Internet	<1%
coursehero.com Internet	<1%
hagi.or.id Internet	<1%
Ivan Koulakov. "Studying deep sources of volcanism us Crossref	ing multiscale s <1%
Ajou University Graduate School on 2022-02-05 Submitted works	<1%



Universitas Negeri Surabaya The State University of Surabaya on 2018-...
Submitted works