

IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE TOMOGRAFI SEISMIK WAKTU TEMPUH DI WILAYAH SUMATERA BAGIAN UTARA

Athina Roussely¹, Faiz Muttaqy², Atin Nur Aulia², Ade Surya Putra², Sarwo Sucitra Amin^{1*}, Bayu Pranata³

¹ Teknik Kebumihan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Mendalo Darat, Jambi, 36361, Indonesia

² Pusat Riset Kebencanaan Geologi Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia

³ Pusat Gempabumi dan Tsunami, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, Indonesia
email: sarwosucitra@unja.ac.id

ABSTRAK

Sumatra memiliki catatan kegempaan yang cukup tinggi yang dipengaruhi oleh aktivitas tektonik dan aktivitas vulkanik, terkhususnya pada wilayah Sumatera bagian Utara pada koordinat 1° LU – 7° LU dan 93° BT – 101° , data yang digunakan berasal dari Katalog BMKG sebanyak 1207 event sejak tahun 2009-2020 dan 46 stasiun. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak Simulps12, proses inversi menggunakan metode LSQR (Least Squares), serta teknik penjejakan pseudo-bending untuk meningkatkan akurasi hasil. Pada area permukaan kehadiran respon anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s tinggi menunjukkan kehadiran area sedimentasi di sisi timur pulau dan sebagai zona lemah berupa struktur geologi, sedangkan zona subduksi memiliki respon anomali kecepatan tinggi yang bersesuaian dengan kehadiran hiposenter gempabumi. Zona subduksi pada area penelitian merupakan area subduksi dangkal dengan zona peleburan sebagian yang relatif dangkal hingga menengah, yang mempengaruhi gunung api area penelitian. Zona peleburan sebagian diwakili oleh respon anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah, respon ini menyebarkan hingga di bawah gunung api sebagai kehadiran suplai magma dan kehadiran dapur magma. Pada respon anomaly positif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah menunjukkan kehadiran zona kompak pada permukaan, di sekitar kaldera toba respon ini menunjukkan kehadiran bekas konduit dari intrusi magma.

Kata Kunci: Tomografi Seismik; Sumatera bagian Utara; Simulps12; Least Squares; V_p ; V_s ; Rasio V_p/V_s

ABSTRACT

[Title: Identification Of Subsurface Structures Using The Seismic Tomography Method With Travel Time In The Northern Sumatera Region] Sumatra exhibits a notably high seismicity record, primarily influenced by both tectonic and volcanic activities, particularly in the northern region of Sumatra, within the coordinates of 1° N – 7° N and 93° E – 101° E. The dataset utilized in this study is derived from the BMKG Catalog, comprising 1,207 seismic events recorded between 2009 and 2020, and data from 46 seismic stations. Data processing was conducted using the Simulps12 software, with inversion procedures employing the LSQR (Least Squares) method, as well as the pseudo-bending ray tracing technique to enhance the accuracy of the results. At the surface, the presence of negative V_p and V_s anomaly responses, accompanied by high V_p/V_s ratios, indicates sedimentary zones on the eastern side of the island and delineates weak zones associated with geological structures. In contrast, the subduction zone is characterized by high-velocity anomaly responses, which correspond with the distribution of earthquake hypocenters. The subduction zone within the study area represents a shallow subduction system with a relatively shallow to intermediate partial melting zone, which influences the regional volcanism. The partial melting zone is represented by negative V_p and V_s anomaly responses with low V_p/V_s ratios; these anomalies extend beneath the volcanoes, indicating the presence of magma supply channels and magma chambers. Conversely, positive V_p and V_s anomaly responses with low V_p/V_s ratios at the surface are indicative of compact zones; in the vicinity of the Toba caldera, such responses suggest the presence of remnant conduits from past magmatic intrusions.

Keywords: Seismic Tomography; Northern Sumatra; Simulps12; Least Squares; V_p ; V_s ; V_p/V_s Ratio

PENDAHULUAN

Pulau Sumatra memiliki geologi tektonik yang kompleks, yang dibagi menjadi 3 sistem, sistem subduksi, sistem sesar mentawai (*mentawai fault system*), dan sistem sesar sumatra (*sumatra fault*

system), yang menjadi penyebab utama terjadinya gempabumi baik di darat maupun di laut.

Proses subduksi yang terjadi pada barat Sumatra mengakibatkan pengangkatan Bukit Barisan Sumatra yang merupakan barisan gunung berapi

serta menghasilkan rangkaian *forarc islands* yang merupakan bagian dari prisma akresi. Saat terjadi penunjaman, gugus hidroksil akan lepas dari batuan penyusun kerak samudra. Kehadiran gugus hidroksil ini membuat terjadinya perubahan batas kesetimbangan fasa padat-cair, sehingga sebagian mantel atas pada astenosfer atas meleburkan atau sering disebut melebur sebagian/*partial melting*. Hasil peleburan akan menjadi magma dan bergerak ke permukaan akibat dari densitasnya lebih kecil (Bambang, 2009).

Di bawah Sumatera, kemiringan lempeng di sebelah utara kaldera Toba dangkal, sedangkan kemiringan di sebelah selatan relatif curam dan berangsur-angsur menjadi vertikal. Lebih jauh lagi, penurunan kemiringan yang dramatis terjadi dari sebelah barat Selat Sunda ke sebelah timur. Sudut konvergensi antara lempeng Indo-Australia dan Sunda diperkirakan berubah dari di bawah 20° di Sumatera Selatan menjadi hampir 30° di Sumatera Utara, menghasilkan komponen lateral dekstral yang signifikan (Liu dkk, 2021).

Dalam peta rawan bencana nasional Indonesia (Amri dkk, 2016), Pulau Sumatra secara keseluruhan merupakan area rawan bencana gempa bumi, tsunami, dan aktivitas gunung api. Pada area penelitian beberapa gempa dengan skala besar yang pernah terjadi seperti gempa tsunami Aceh-Andaman pada Desember 2004 dan gempa Nias-Simeulue pada 28 Mei 2005 terjadi di zona antarmuka Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke Lempeng Eurasia.

Berdasarkan studi mekanisme dan distribusi geografisnya, gempa di Sumatra dikelompokkan menjadi 3 bagian (Naryanto, 2005), yaitu:

- a. Gempa yang berhubungan dengan proses penunjaman Lempeng Samudra Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Gempa-gempa dangkal sering terjadi terutama mempunyai pusat gempa di sebelah barat Pulau Sumatra, yaitu perairan Samudra Hindia termasuk terjadi pada Pulau Nias dan sekitarnya.
- b. Gempa yang berhubungan dengan pergerakan sepanjang zona patahan aktif.
- c. Gempa yang berhubungan dengan aktivitas magmatik atau hidrotermal.

Area penelitian mengambil sisi utara Pulau Sumatra yang mencakup Provinsi Sumatra Utara dan Aceh, kehadiran struktur geologi yang kompleks terkhususnya zona subduksi, zona sesar, dan zona magmatisme menjadi sumber utama kehadiran gempabumi pada area penelitian. Ke tiga zona diasumsikan saling mempengaruhi, kehadiran zona subduksi pada sisi barat pulau diasumsikan menjadi

sumber suplai magma pada gunung api aktif, seperti Gunung Sinabung di Sumatra Utara dan Gunung Burni Telong di Aceh, namun pada sebagian segmen Sesar Sumatra kehadiran suplai magma sebagai hasil peleburan sebagian juga mempengaruhi aktivitas sesar.

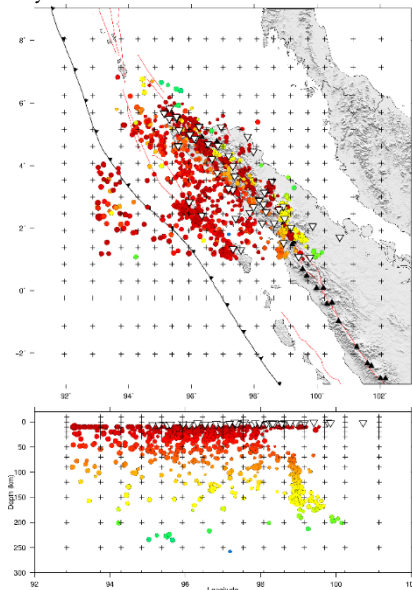
Tumbukan subduksi juga menghasilkan rangkaian kepulauan busur (*fore-arc islands*) yang bersifat non-vulkanik (Pulau Simeulue, Pulau Nias, dan sebagainya) pada sisi barat Sumatra, pada hasil plotting hiposenter gempa gambar 1, Pulau Nias dan Pulau Simeulue memiliki aktivitas seismik yang tinggi dan juga cacatan gempa besar. Sedangkan area Provinsi Aceh, kehadiran gempabumi didominasi disebabkan oleh pergerakan zona subduksi dan zona Sesar Sumatra. Untuk Provinsi Sumatra Utara area dengan seiminitas tinggi terlihat menghapit area Sesar Sumatra dan gunung api aktif, namun beberapa dengan kedalaman lebih dari 60 km terlihat di sekitar Kaldera Toba.

Saat gempabumi terjadi, pelepasan energi menjalar ke segala arah dalam bentuk gelombang seismik selama di bawah permukaan, pada saat tiba dipermukaan energi berubah menjadi getaran (Siska, 2019). Selama penjalaran, gelombang merambat melalui sela-sela bebatuan di dalam medium bumi (*body wave*), menghasilkan perbedaan kecepatan gelombang P dan gelombang S (Gylfy dkk., 1991). Dalam kasus ini pencitraan bawah permukaan dalam identifikasi zona subduksi, zona sesar, dan zona vulkanisme gunung api digunakan metode tomografi seismik. Tomografi seismik merupakan metode yang efektif dalam menggambarkan struktur bawah permukaan dengan memanfaatkan data kecepatan gelombang seismik yang bersumber dari gempabumi. Dengan memetakan anomali V_p , V_s , dan rasio V_p/V_s yang memberi informasi atas respon gelombang terhadap medium yang dilewati dan menghasilkan model 3D untuk struktur bawah permukaan.

Tomografi seismik menggunakan waktu tempuh gelombang pertama yang diterima oleh penerima, atau perhitungan waktu tempuh gelombang dari hiposenter menuju stasiun pencatat gempa. Waktu tempuh yang tercatat berbanding lurus dengan cepat rambat gelombang, semakin cepat gelombang merambat pada suatu medium waktu tempuh menuju stasiun semakin singkat. Cepat rambat gelombang dipengaruhi oleh jenis medium, medium dengan densitas yang tinggi akan memantulkan gelombang dengan baik sedangkan medium dengan densitas yang rendah akan mengabsorpsi energi gelombang sehingga kecepatan gelombang berkurang (Raharjo, 2022).

METODE

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa waktu tiba gelombang berdasarkan hasil *picking* otomatis dan hiposenter awal dari BMKG sebanyak 1207 *event* sejak tahun 2009-2020, dengan 46 stasiun perekam seismik lokal BMKG, dan menggunakan model kecepatan awal homogen berdasarkan referensi model kecepatan 1 D berupa AK 135 dan *crust 1.0*. Parameterisasi model menjadi hal pertama dalam perhitungan tomografi seismik, dengan menentukan ukuran grid dan model kecepatan awal yang digunakan. Ukuran grid yang akan digunakan dipengaruhi oleh luas area studi, distribusi stasiun, dan distribusi event gempa, pada daerah dengan kerapatan stasiun dan event gempa yang tinggi digunakan ukuran grid yang relatif kecil, sedangkan pada distribusi area seismisitas yang rendah digunakan ukuran grid yang relatif besar, sehingga cakupan penjalaran gelombang seismik per blok nya jauh lebih banyak sehingga mampu menutupi resolusi buruk akibat kurangnya data (Ramadhan dkk, 2020), sehingga pada penelitian ini menggunakan ukuran grid 60 km × 60 km dan dua grid terluar berjarak 100 km dari bagian sebelumnya.

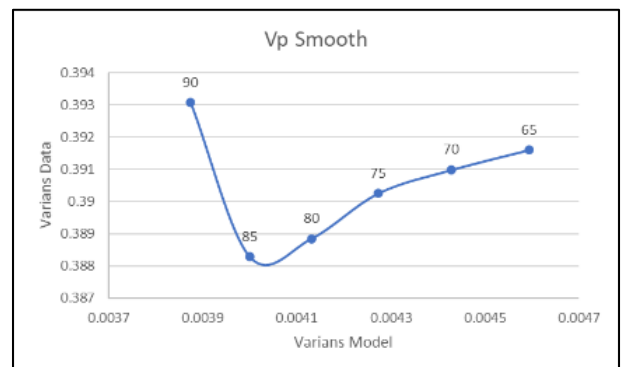


Gambar 1. Persebaran titik grid yang digunakan pada penelitian dengan event gempa sebelum relokasi.

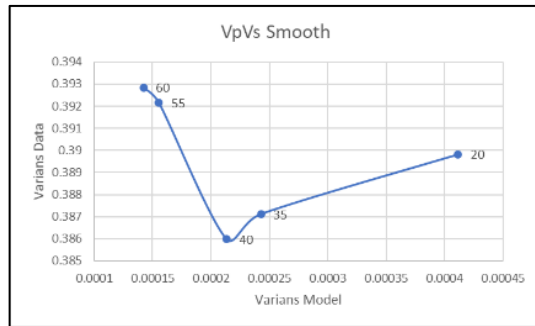
Pada penelitian ini inversi seismik menggunakan *code* Simulps12, dengan metode *ray tracing pseudo bending*. Penjejakkan sinar sangat berguna untuk menghitung waktu tempuh kalkulasi dari sumber gempa menuju stasiun penerima berdasarkan model referensi bumi, konsep dasar yang digunakan dalam menformulasikan *pseudo bending* adalah prinsip Fermat yang digunakan untuk

mencari lintasan sinar atau berkas gelombang dengan waktu terpendek atau minimum. Semakin tinggi kecepatan suatu medium maka energi gelombang pada medium tersebut menjadi lebih tinggi sehingga waktu tempuh berkas gelombang semakin pendek (singkat) (Hamimu dkk, 2024). Inversi menggunakan metode LSQR (*Least Squares*), yang tujuan utamanya yaitu merekonstruksi citra kelambatan (*slowness*) dari data waktu yang diperoleh dari proses *ray tracing*. Pada tahap inversi kecepatan gelombang digantikan dengan kelambanan untuk memudahkan perhitungan. Hal ini dikarenakan persamaan inversi pada persamaan menjadi linear ketika berada dalam domain kelambanan (*slowness*) (Monalia, 2011).

Pada tahapan ini uji damping (grafik trade off) dilakukan dengan menggunakan analisis kurva trade-off untuk mendapatkan nilai redaman (damping) yang optimum, nilai redaman optimum dilakukan dengan meningkatkan nilai varians model (norma model sebagai sumbu X) dan menurunkan varians data (kesalahan prediksi data sebagai sumbu Y) (Wulandari dkk, 2017). Kurva trade-off yang digunakan adalah hasil smooth yang telah membentuk kurva “L”. Kurva “L” adalah representasi grafik yang menunjukkan hubungan antara dua variabel, yang menentukan parameter damping yang optimal. Pengambilan titik damping (redam) menggunakan titik siku (Knee Point) pada Kurva “L”. Pengujian dilakukan dengan melakukan inversi sebanyak satu kali dan memvariasikan nilai damping V_p dan V_s dengan nilai divariasikan dari rentang 10-90 pada kelipatan lima, sehingga didapatkan nilai damping optimal pada gelombang P (V_p smooth) berada pada 85 (Gambar 2) dan gelombang S (V_s smooth) berada pada 40 (Gambar 3). Setelahnya iterasi dilakukan sebanyak 10 kali untuk menghasilkan CKB dan plot tomogram akhir untuk interpretasi akhir.



Gambar 2. Kurva *trade-off* antara *variens data* dengan *variens model* untuk nilai damping kecepatan gelombang P.



Gambar 3. Kurva *trade-off* antara *varians data* dengan *varians model* untuk nilai damping kecepatan gelombang S.

Uji resolusi CRT menggunakan nilai persen perturbasi pada Vp dan rasio Vp/Vs yang merupakan selisih antara hasil model kecepatan sesudah inversi dan sebelum inversi sehingga menghasilkan pola papan catur. Pola CRT bergantung pada persebaran event gempa dan stasiun perekam, semakin banyak event yang tertangkap oleh perekam semakin baik CRT yang dihasilkan, namun semakin sedikit event dan persebaran stasiun perekam maka CRT tidak dapat berbentuk blok (Widiyantoro dkk, 2000).

Akibat keberadaan pola CRT yang mengalami pemudaran di beberapa kedalaman sehingga dilakukan metode uji resolusi lainnya untuk menentukan apakah hasil inversi dapat diandalkan untuk interpretasi atau tidak, tiga metode yang digunakan: Elemen Resolusi Diagonal (DRE) (Lampiran 2), *Derivative Weight Sum* (DWS) (Lampiran 1), dan *Ray Hit Count* (RHC) (Lampiran 3), pola kotak-kotak CRT yang baik biasanya konsisten terhadap nilai DWS, RHC, dan DRE (Muttaqy dkk, 2022). DRE memberikan estimasi yang lebih baik dari resolusi model untuk setiap simpul karena DRE mengukur kontribusi relatif dari nilai model hipotesis “sebenarnya” terhadap nilai estimasi. Untuk matriks elemen diagonal (DRE) nilai 1 menunjukkan bahwa parameter model benar-benar terselesaikan dan nilai 0 menunjukkan bahwa parameter model benar-benar tidak terselesaikan. DWS mengukur cakupan sinar dari data dengan memperkirakan total panjang sinar yang menjadi

sampel dari sebuah simpul. Nilai DWS yang tinggi menunjukkan zona resolusi yang tinggi, RHC digunakan untuk menemukan jumlah jalur sinar yang melewati node grid. Peningkatan jumlah jalur sinar menunjukkan zona resolusi tinggi yang dapat diinterpretasi dengan baik.

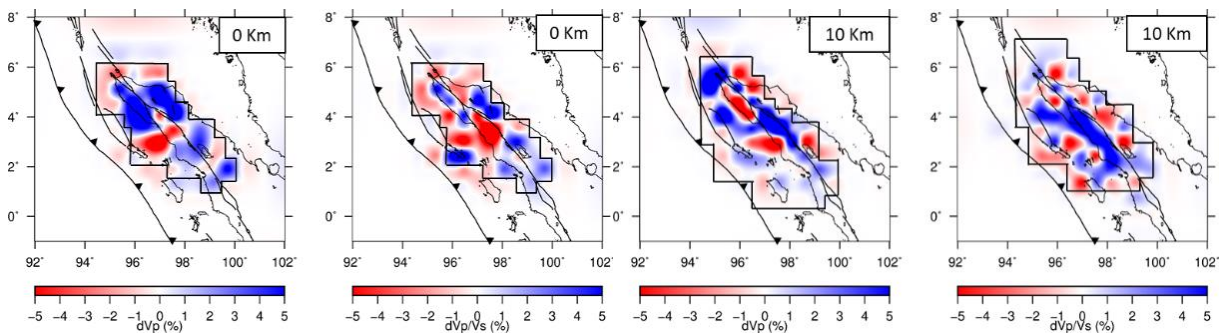
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Uji Resolusi *Checkerboard* (CRT)

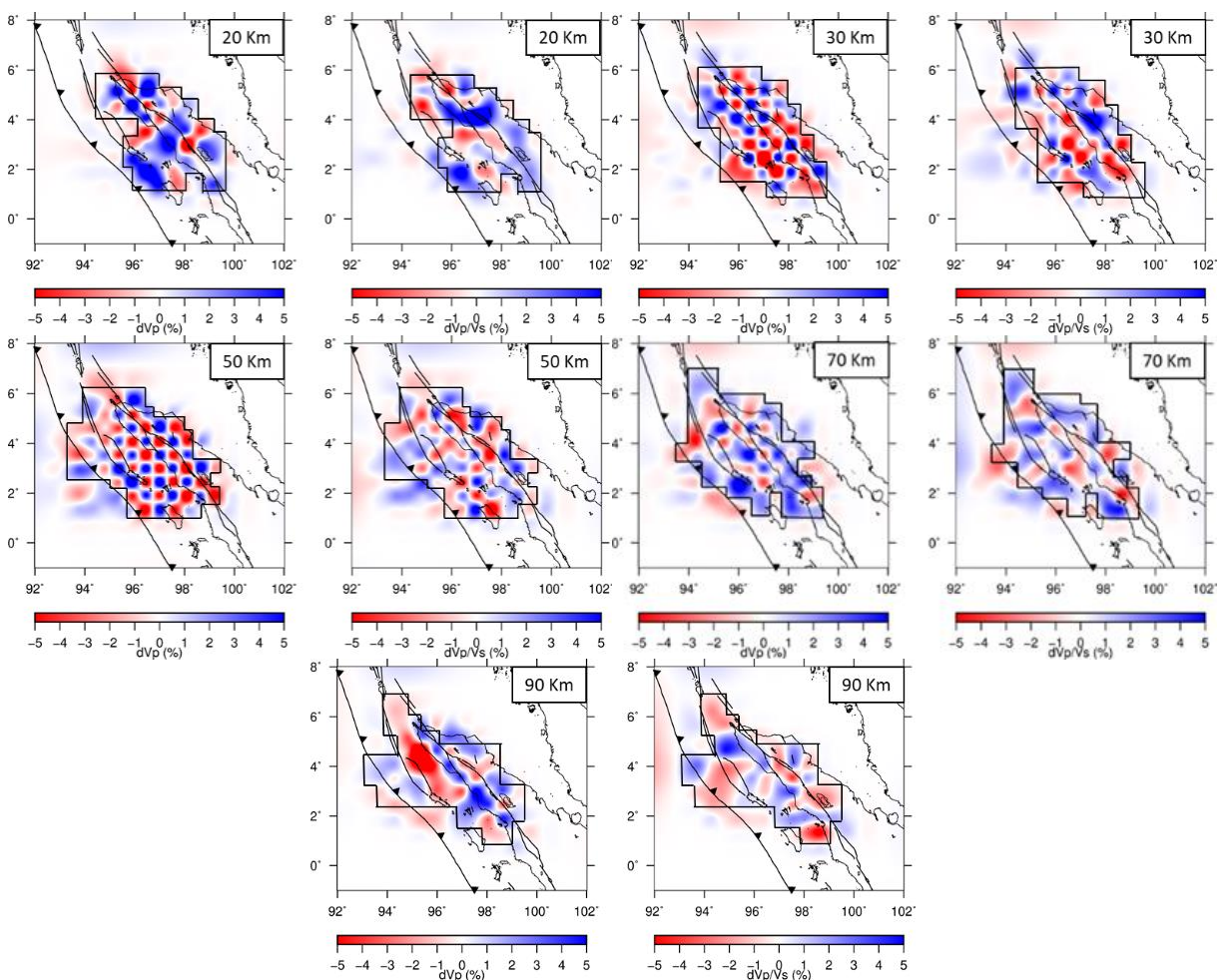
Uji tersebut digunakan untuk mengetahui kehandalan data seismik yang digunakan serta mengetahui secara spasial area mana saja yang bisa diinterpretasi dari suatu tomogram seismik. CRT hasil inversi kembali ke rekonstruksi awal menggunakan model kecepatan sintetik, sehingga area yang memiliki kemiripan pola menunjukkan bahwa area tersebut dapat diinterpretasikan dengan baik secara geologi maupun properti fisika batuan (Ramadhan dkk, 2020).

Pola CRT bergantung pada persebaran event gempa dan stasiun perekam, sehingga pada area penelitian distribusi gempa berada pada kedalaman <90 km (dominasi pada kedalaman 50 km), sehingga CRT akan mengalami pemudaran resolusi seiring dengan penambahan kedalaman. Pada uji resolusi horizontal, pola CRT yang baik (membentuk kotak) berada pada kedalaman 30 km dan 50 km (Gambar 4 & Gambar 5). Sedangkan pada uji resolusi vertikal (Gambar 6) mencangkup atau menggunakan data seismik sepanjang 60 km secara mendatar, sehingga hasil resolusi yang dihasilkan berbeda (kedalaman dan bentuk resolusi).

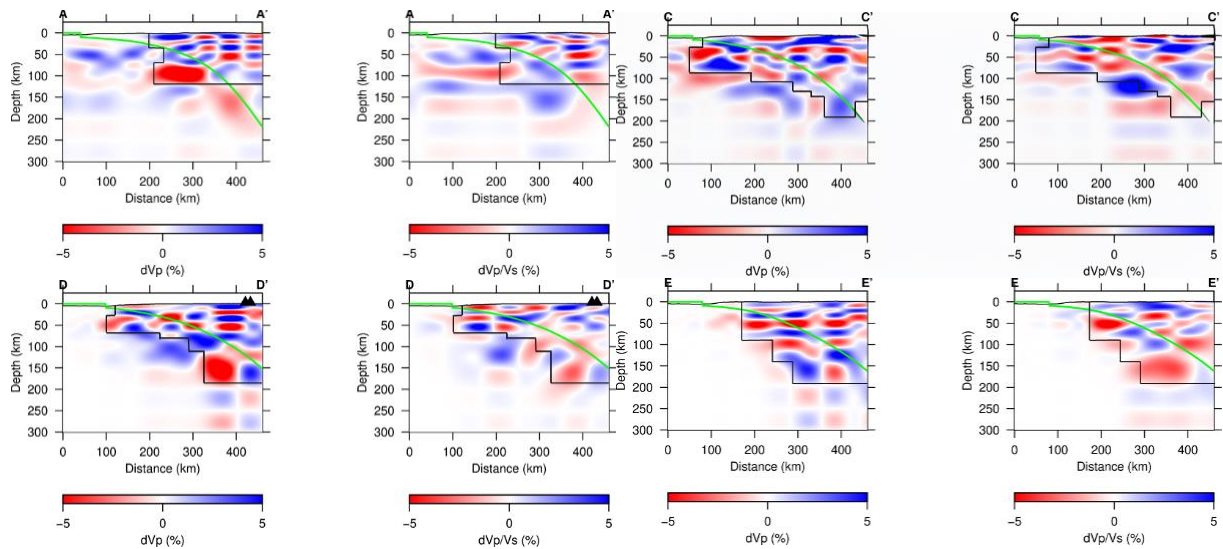
Pembatasan area dilakukan dengan mempertimbangkan bentuk pola kotak papan catur perkedalaman seperti kedalaman 30 km dan 50 km, sedangkan kedalaman dengan pola papan catur yang kurang baik (masih membentuk namun tidak sempurna) pembatasan dilakukan dengan mempertimbangkan pola yang masih dapat terlihat seperti kotak serta resolusi yang baik. Sehingga pada kedalaman lanjutan, pembatasan area akan semakin mengecil sejalan dengan area yang dapat teresolusi.



Gambar 4. Plot tomogram hasil uji resolusi *Checkerboard* horizontal V_p untuk sisi kanan dan rasio V_p/V_s untuk sisi kiri pada kedalaman 0 km hingga 10 km.



Gambar 5. Plot tomogram hasil uji resolusi *Checkerboard* horizontal V_p untuk sisi kanan dan rasio V_p/V_s untuk sisi kiri pada kedalaman 20 km hingga 90 km.



Gambar 6. Plot tomogram hasil uji resolusi *Checkerboard* vertikal Vp untuk sisi kanan dan rasio Vp/Vs untuk sisi kiri untuk penampang A-A', penampang C-C', penampang D-D', dan penampang E-E'.

2. Analisis Tomogram Horizontal

Hasil tomografi berupa sayatan horizontal dan vertikal dengan nilai anomali gelombang P, anomali gelombang S dan rasio Vp/Vs. Anomali gelombang P dan S digambarkan dalam satuan persen (%) perturbasi, gradasi warna biru tua menunjukkan anomali kecepatan positif maksimum, sedangkan warna merah tua menunjukkan anomali kecepatan negatif maksimum. Anomali kecepatan positif menunjukkan bahwa kecepatan yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan yang kecepatan model awal pada daerah tersebut serta menandakan adanya batuan keras dan bersifat lebih padat pada daerah tersebut.

Anomali kecepatan negatif menunjukkan bahwa kecepatan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan kecepatan rata-rata daerah tersebut. Nilai kecepatan gelombang P yang lebih rendah teramati dalam batuan yang memiliki porositas tinggi dan kehadiran rekahan juga akan mengurangi kecepatan seismik dibandingkan dengan batuan utuh.

Anomali negatif pada area dekat permukaan atau berada di bawah gunung api dapat diasumsikan sebagai kehadiran zona atau daerah lemah seperti sesar atau struktur bawah permukaan hasil kegiatan tektonik, kehadiran rekahan atau daerah sedimentasi yang bertekanan jenuh (Wulandari dkk, 2017), daerah lemah yang biasanya diduga berkaitan langsung dengan peningkatan fluida dan pelelehan slab subduksi yang disebabkan fase transisi (Suantika, 2009).

Berdasarkan hasil penelitian Sanders dkk, 1995, perubahan Vp atau Vs dapat dikaitkan dengan perubahan pada banyak properti (litologi, suhu,

struktur kristal, kerapatan retak, atau ada/tidaknya fase lain seperti lelehan, gas, dan/atau cairan berair). Pada penelitian Moos dkk., 1983, respon Vp/Vs yang bernilai tinggi sering dikaitkan dengan retakan pada batuan yang berisi fluida dan tingginya tingkat saturasi air. Sedangkan rasio Vp/Vs rendah dikaitkan dengan batuan kering yang terisi oleh gas.

Secara umum respon tomografi keseluruhan pada area penelitian, pada kedalaman 0 km dan 10 km bagian timur Pulau Sumatra menghasilkan respon negatif Vp, Vs, dengan rasio tinggi Vp/Vs menunjukkan bahwa bagian timur Pulau Sumatra sebagian besar berupa hutan rawa dan merupakan dataran rendah, bagian ini merupakan hasil dari pengendapan material yang terbawa oleh aliran sungai dari sayap timur zona barisan, pengendapan ini disebabkan oleh adanya pengangkatan bagian barat Pulau Sumatra, berdasarkan peta geologi dari yang dipublikasikan oleh Crow & Barber (2005) geologi regional pada pesisir timur Pulau Sumatra terdiri atas endapan sedimen alluvial sebagai hasil pengendapan darat dan laut dangkal.

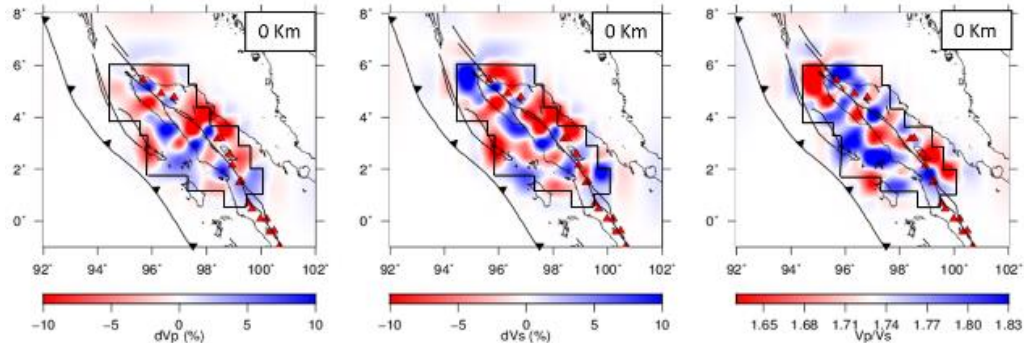
Pada sisi barat Pulau Sumatra tumbukan antara lempeng menghasilkan *forearc region* dan patahan besar (*megathrust*), kondisi ini mengakibatkan daerah Pulau Nias dan Pulau Simeulue memiliki seismisitas yang tinggi, aktivitas gempa dangkal ini kemungkinan besar disebabkan oleh interaksi lempeng yang menghasilkan zona subduksi aktif atau dikenal sebagai zona megathrust.

Anomali negatif kecepatan P dan S dengan rasio Vp/Vs tinggi berupa hasil respon dari batuan sedimen, hal ini ditunjukkan pada kedalaman 30 Km dibawah Pulau Nias dan 0 km hingga 10 km dibawah

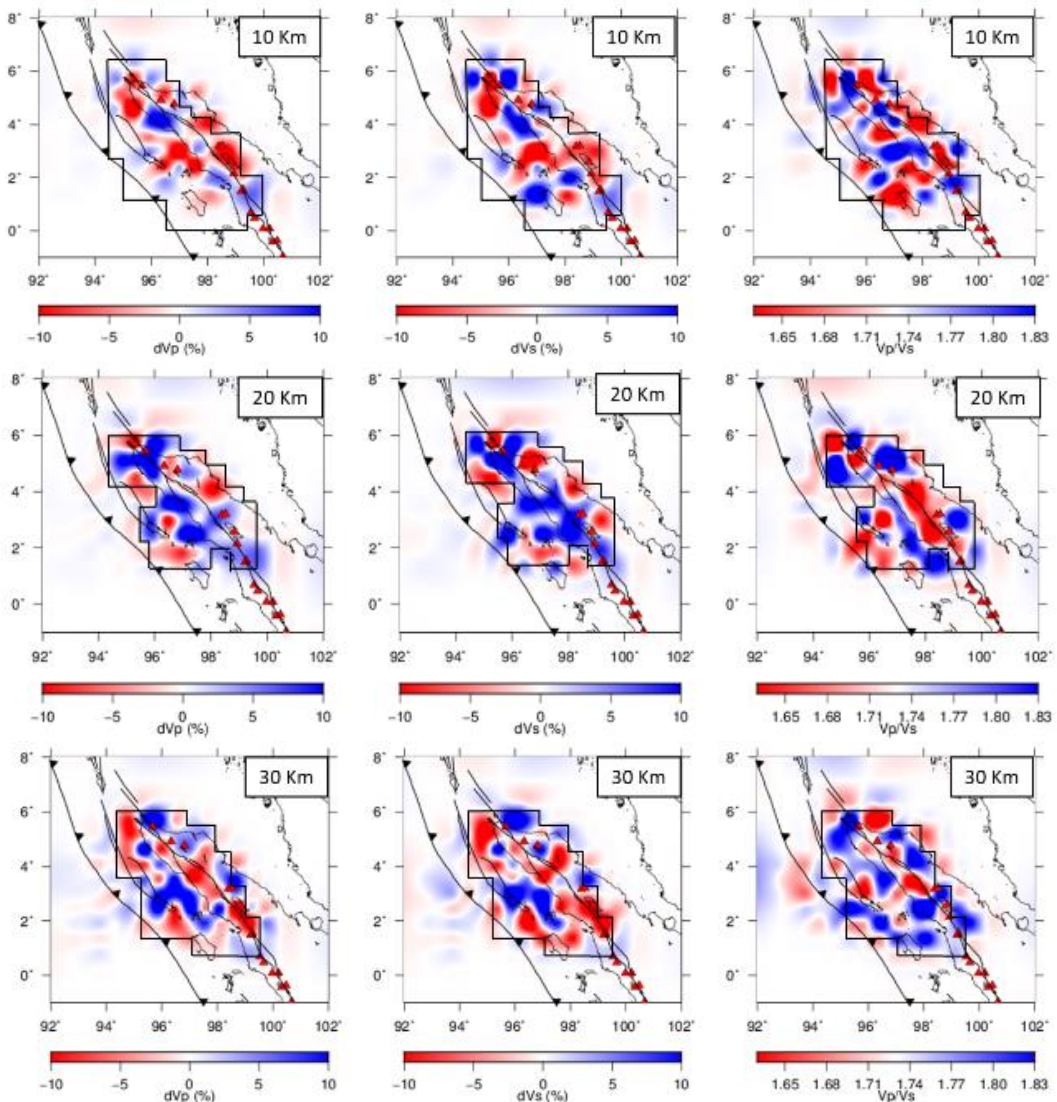
Pulau Simeulue. V_p/V_s yang bernilai tinggi sering dikaitkan dengan retakan pada batuan yang berisi fluida dan tingginya tingkat saturasi air (Yanuarsi, 2019). Namun kehadiran rasio V_p/V_s tinggi juga dapat diidentifikasi sebagai kehadiran segmen patahan pada kedua pulau.

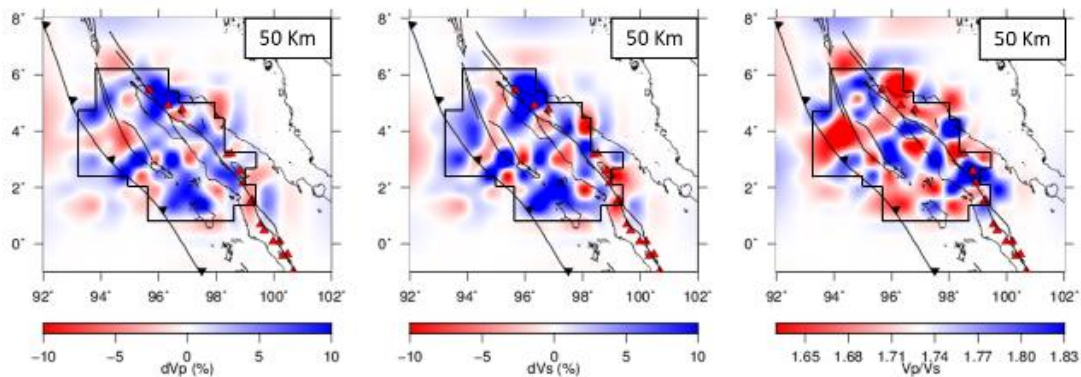
kompak, anomali ini terlihat pada kedalaman 20 km-70 km dibawah Pulau Simeulue, dan kedalaman 10 km dan 50 km dibawah Pulau Nias. Batuan kompak yang berada di bawah Pulau Nias diperkirakan berupa saluran suplai magma yang tidak aktif atau telah mendingin.

Anomali positif kecepatan P dan S dengan rasio V_p/V_s rendah yang menunjukkan batuan

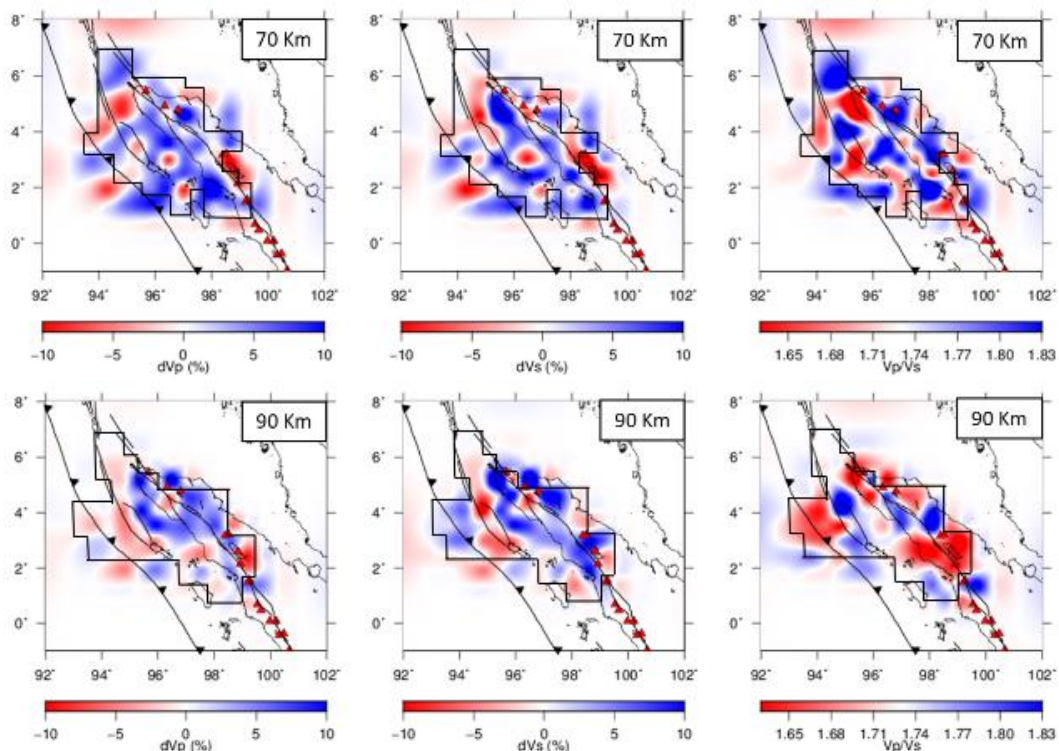


Gambar 7. Tomogram V_p , V_s , dan rasio V_p/V_s dari kiri ke kanan dengan garis hitam sebagai pembatas area yang dapat diinterpretasi pada kedalaman 0 km.





Gambar 8. Tomogram V_p , V_s , dan rasio V_p/V_s dari kiri ke kanan dengan garis hitam sebagai pembatas area yang dapat diinterpretasi pada kedalaman 10 km hingga 50 km.



Gambar 9. Tomogram V_p , V_s , dan rasio V_p/V_s dari kiri ke kanan dengan garis hitam sebagai pembatas area yang dapat diinterpretasi pada kedalaman 0 km.

3. Analisis Tomogram Vertikal

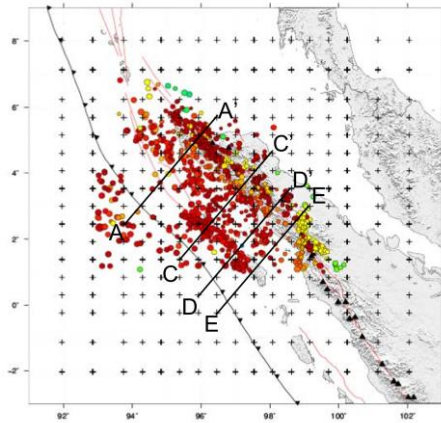
Lintasan tomogram vertikal dibagi menjadi 4 bagian, A-A', C-C', D-D', dan E-E' dengan arah menyerong dari Barat Daya menuju Timur Laut yang memotong tegak lurus terhadap zona subduksi.

Garis model subduksi hayas diwakilkan oleh garis hijau, dengan respon anomali kecepatan tinggi (Rohmainah, 2019), namun pada hasil penelitian tidak seluruh bagian pada lempeng subduksi pada garis ini yang memiliki respon anomali serupa, kehadiran anomali negatif di sepanjang garis subduksi berada dekat permukaan diasumsikan sebagai kehadiran zona sedimentasi (respon anomali

positif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah), sehingga dilakukan penarikan garis slab berdasarkan respon tomogram anomali positif V_p dan V_s serta aktivitas seismik, penarikan ini ditunjukkan oleh garis interpretasi berwarna oranye.

Respon anomali perubahan kecepatan rendah mengindikasikan adanya zona lemah atau keberadaan fluida panas, zona partial melting di Pulau Sumatra berada pada kedalaman 100 km dengan respon yang serupa. Beberapa penelitian sebelumnya mengasosiasikan anomali kecepatan negatif pada kedalaman ini sebagai aliran fluida yang berasal dari hasil partial melting aktivitas tektonik

yang terjadi pada lapisan mantel, dimana lempeng Samudra menyusup lempeng benua (Liu dkk, 2021). Oleh karena itu, distribusi vertikal hiposentrum dapat diberikan sebagai representasi sederhana untuk memperkirakan kedalaman pencairan sebagian. Pencairan sebagian, tahap pertama dalam system vulkanik, mengubah sebagian kecil massa batuanpadat menjadi cairan (magma) (Asimow, 2016).



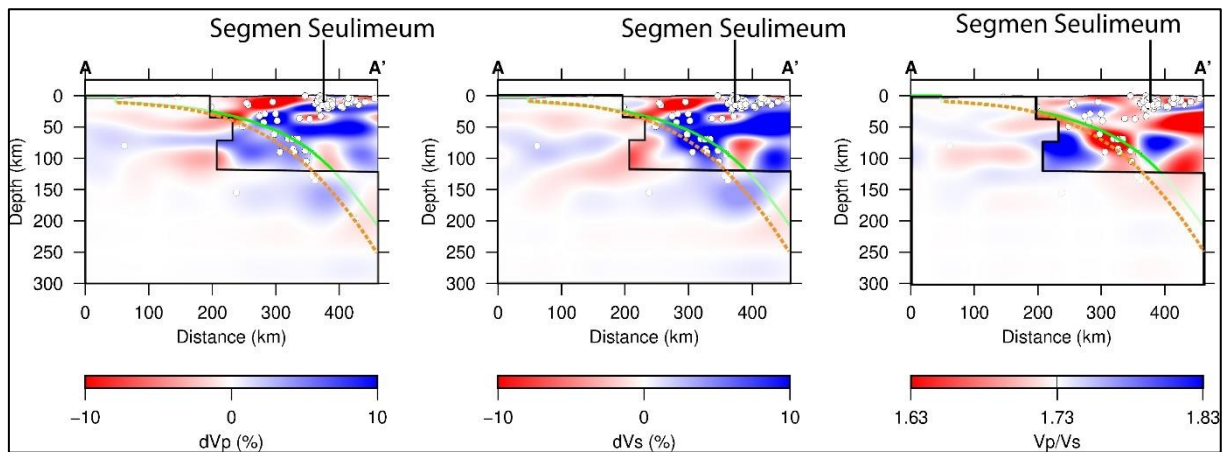
Gambar 10. Plot lintasan tomogram penampang vertikal.

Analisis tomogram A-A' memotong zona subduksi dan segmen seulimeum yang menjadi sumber gempa bumi di sekitar wilayah. Pada hasil

tomogram, anomali negatif kecepatan P, S, dengan rasio V_p/V_s rendah yang berada dekat permukaan diasosiasikan dengan adanya daerah lemah seperti zona sesar sumatra (segmen seulimeum), berdasarkan hasil plotting cross seismik, penampang ini menampilkan gempa bumi dangkal pada zona anomali ini, aktivitas gempa bumi hasil relokasi didapatkan berada pada kedalaman <50 km yang diperkirakan menghampit sesar seulimeum dan menghampit garis subduksi.

Respon sesar sejalan dengan penelitian Wulandari dkk (2017), kecepatan anomaly negatif dengan rasio V_p/V_s tinggi berada di sekitar Zona Sesar Sumatra yang menandakan bahwa batuan disekitar zona memiliki porositas yang tinggi. Kehadiran sesar diidentifikasi sebagai batuan yang mengalami rekahan akibat pergeseran (Bujung, 2020), kehadiran rekahan yang menyebabkan penurunan kecepatan rambat gelombang P.

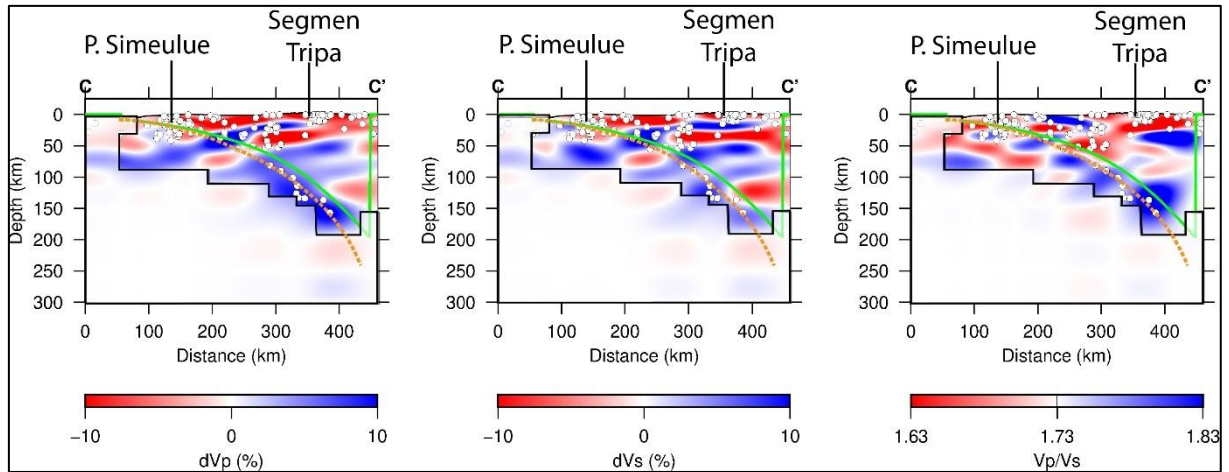
Pada kedalaman 100 km terdapat anomali negatif kecepatan V_p dan V_s dengan rasio V_p/V_s yang tinggi, hal ini dapat diinterpretasikan sebagai zona partial melting. Sedangkan bagian anomali positif pada V_p dan V_s dengan rasio V_p/V_s rendah menunjukan kehadiran slab.



Gambar 11. Tomogram vertikal A-A' dengan batas area resolusi yang didapat dari CRT.

Analisis tomogram C-C' memotong zona subduksi, Pulau Simeulue, dan segmen Tripa. Anomali negatif pada kecepatan P dan S dan rasio V_p/V_s tinggi yang tersebar pada kedalaman 0 hingga 50 Km menandakan sebagai zona lemah, pada jarak 100 Km hingga 200 Km aktivitas gempa akibat tektonik terlihat, jarak ini diperkirakan berada disekitar Pulau Simeulue, kehadiran anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah menunjukkan kehadiran satuan sedimen, namun pada kedalaman selanjutnya justru terdapat sisipan anomali positif

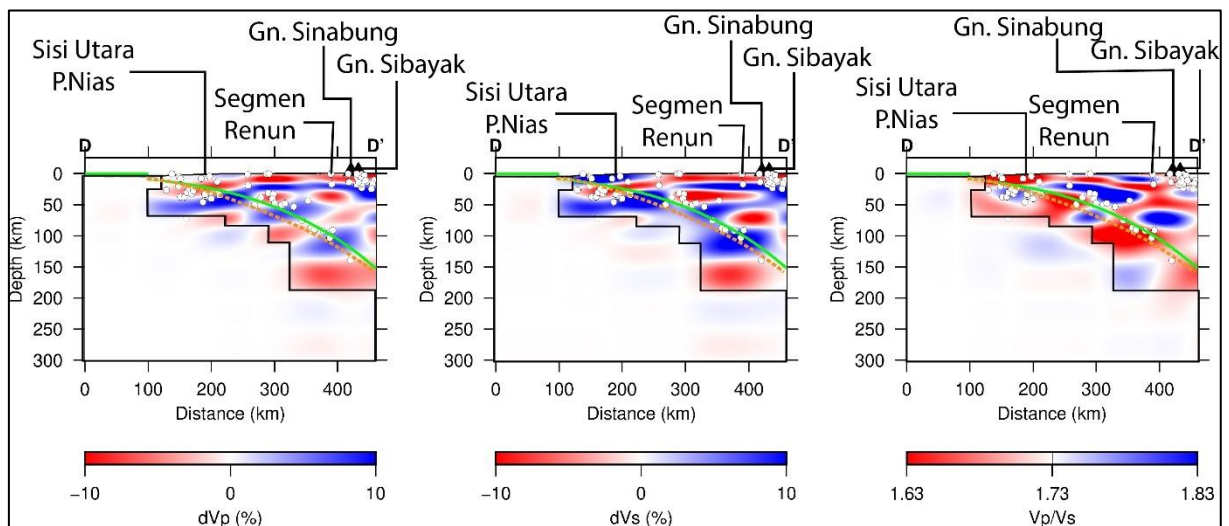
V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah yang diperkirakan sebagai batuan kompak. Pada jarak 300 Km hingga 400 Km seismisitas yang terjadi cukup banyak pada zona lemah yang berada pada segmen Tripa, segmen ini diikuti dengan respon negative V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah. Pada kedalaman 150 Km diperkirakan sebagai kehadiran zona partial melting dengan anomali negatif pada kecepatan V_p dan V_s , dengan rasio V_p/V_s tinggi.



Gambar 12. Tomogram vertikal C-C' dengan batas area resolusi yang didapat dari CRT.

Analisis tomogram D-D' memotong zona subduksi, segmen Renun, Gunung Sibayak, dan Gunung Sinabung. Pada penampang horizontal anomali positif kecepatan P dan S dengan rasio Vp/Vs rendah di bawah Gunung Sinabung dan Gunung Sibayak pada kedalaman 20 km hingga 120 km diinterpretasikan sebagai respon zona batuan kompak (Indrastuti dkk, 2019). Sedangkan respon anomali rendah pada 0 km dan 10 km diinterpretasikan sebagai adanya material fluida atau struktur termal di bawah gunung, aktivitas vulkanisme terlihat dari keberadaan hiposenter gempa bumi yang ada, Julian (2013) menemukan kehadiran magma camber pada kedalaman 12 km. Zona partial melting pada kedalaman 100 km dengan nilai anomali negatif pada kecepatan P dan S,

serta rasio Vp/Vs tinggi, yang mengalami perubahan kedalaman jika dibandingkan dengan Sugianto dkk (2023) yang mendapat kedalaman pada 148 km. Anomali negatif pada kecepatan P dan S dan rasio Vp/Vs pada kedalaman yang sama respon anomali negatif Vp, Vs, dengan rasio Vp/Vs rendah diinterpretasikan sebagai zona lemah, keberadaan gempabumi pada jarak 100 km kemungkinan besar terkait keberadaan gempabumi pada sisi utara Pulau Nias yang memiliki seismisitas tinggi, gempa ini diakibatkan oleh pergeseran kedua lempeng. Batuan kompak yang tersebar memiliki respon anomali negatif kecepatan P dan anomaly positif kecepatan S dengan rasio Vp/Vs rendah menunjukkan kehadiran sedimen.



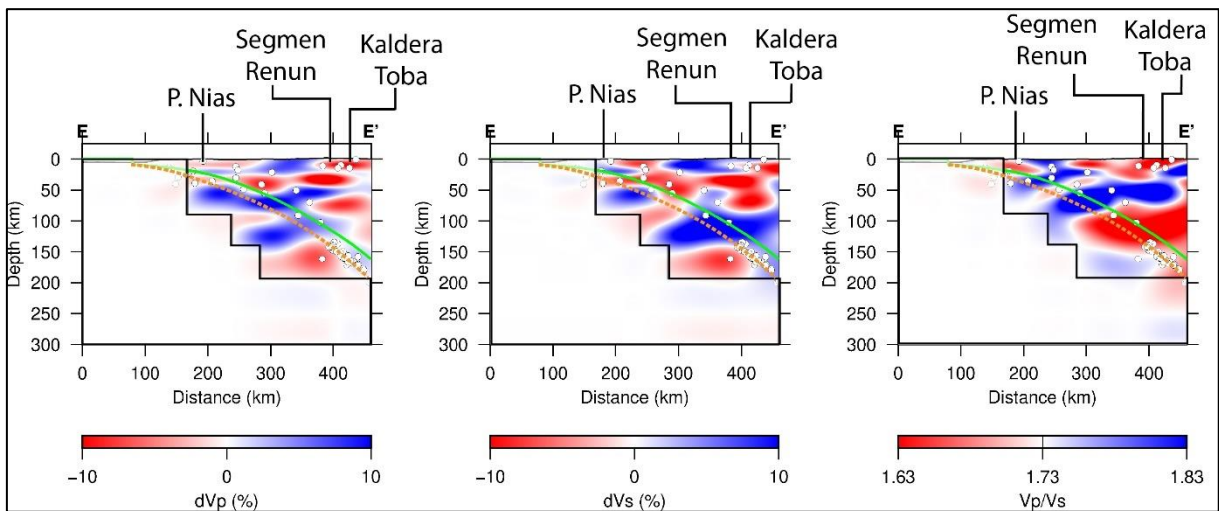
Gambar 13. Tomogram vertikal D-D' dengan batas area resolusi yang didapat dari CRT.

Analisis tomogram E-E' memotong zona subduksi, Segmen Renun dan Gunung Toba, pada hasil tomogram zona partial melting memiliki nilai anomali negatif pada kecepatan P

dan S, serta rasio Vp/Vs tinggi pada kedalaman 150 km disertai dengan adanya aktivitas seismik disepanjang jalur subduksi, segmen Renun diwakili respon negatif Vp, Vs, dengan rasio

V_p/V_s yang rendah. Seismisitas pada kedalaman 0 Km hingga 50 km pada jarak 400 Km diperkirakan berada di bawah Kaldera atau Gunung Toba, menghasilkan respon anomali negatif kecepatan P dan S dengan rasio V_p/V_s rendah diperkirakan sebagai zona lemah dengan porositas rendah yang tidak terisi oleh fluida respon ini sejalan dengan geologi regional toba yang terdiri atas batu pasir tuff, batulanau, konglomerat, dan tanah diatome sebagai hasil pengangkatan kaldera toba (Suhendar, 2014),

respon ini terlihat pada penampang horizontal pada kedalaman 20 km, dimana aktivitas vulkanik yang terjadi berupa ubahan hidrotermal. Pada jarak yang sama dengan respon anomali positif dengan rasio V_p/V_s rendah diidentifikasi sebagai beskas konduit dari intrusi magma yang membeku. Respon ini juga menunjukkan adanya sumbatan lava (lava dome) yang merupakan bagian dari ciri berhentinya proses vulkanisme.



Gambar 14. Tomogram vertikal E-E' dengan batas area resolusi yang didapat dari CRT.

KESIMPULAN

Pada penampang horizontal terlihat persebaran zona kompak yang ditandai dengan respon anomali positif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s tinggi, pada beberapa area dekat dengan permukaan respon negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s tersebar pada area timur Pulau Sumatra pada kedalaman 0 km hingga 20 km sebagai hasil respon zona sedimentasi darat dan laut dangkal, respon anomali ini juga terlihat pada kepulauan Nias dan Simeulue pada kedalaman 0 km hingga 30 km sebagai zona sedimentasi dan indikasi kehadiran segmen sesar. Pada sepanjang Zona Sesar Sumatra diseluruh kedalaman menghasilkan respon anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s tinggi. Sedangkan area dapur magma dan arah suplai magma lebih terlihat jelas pada penampang vertikal.

Penampang vertikal menunjukkan pengaruh subduksi terhadap zona magmatisme, hal ini terlihat arah migrasi dari zona peleburan sebagian (respon anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s tinggi) menuju dapur magma gunung api (respon anomali negatif V_p , V_s , rasio V_p/V_s tinggi) yang disertai kehadiran seismisitas di sekitar gunung api, menandakan bahwa seismisitas berasal dari magmatisme gunung api yang masih aktif. Sedangkan

pada segmen sesar Sumatra terlihat bahwa respon yang didapati berupa anomali negatif V_p , V_s , dengan rasio V_p/V_s rendah yang diapit oleh kehadiran seismisitas.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Dosen Pembimbing pertama yang telah memberi kesempatan melakukan penelitian ini, dan kepada Pusat Riset Kebencanaan Geologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Bandung yang telah mewadahi dan membimbing penulis sehingga penelitian ini dapat terlaksana, serta kepada Pusat Gempabumi dan Tsunami, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Jakarta yang telah memberikan kesempatan dalam memfasilitasi data penelitian dan juga semua pihak yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

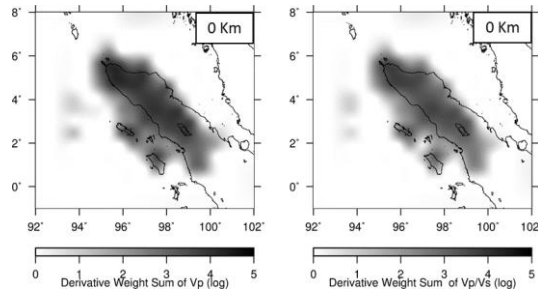
DAFTAR PUSTAKA

- Amri MR, dkk. (2016) Risiko Bencana Indonesia (RBI). Jakarta: BNPB.
- Bambang, P. (2009): Slide Kuliah Geokimia Umum: Batuan Beku Teknik Geologi ITB, Bandung. <https://www.slideshare.net/pramodgpramod/evolution-of-magma-83659717>

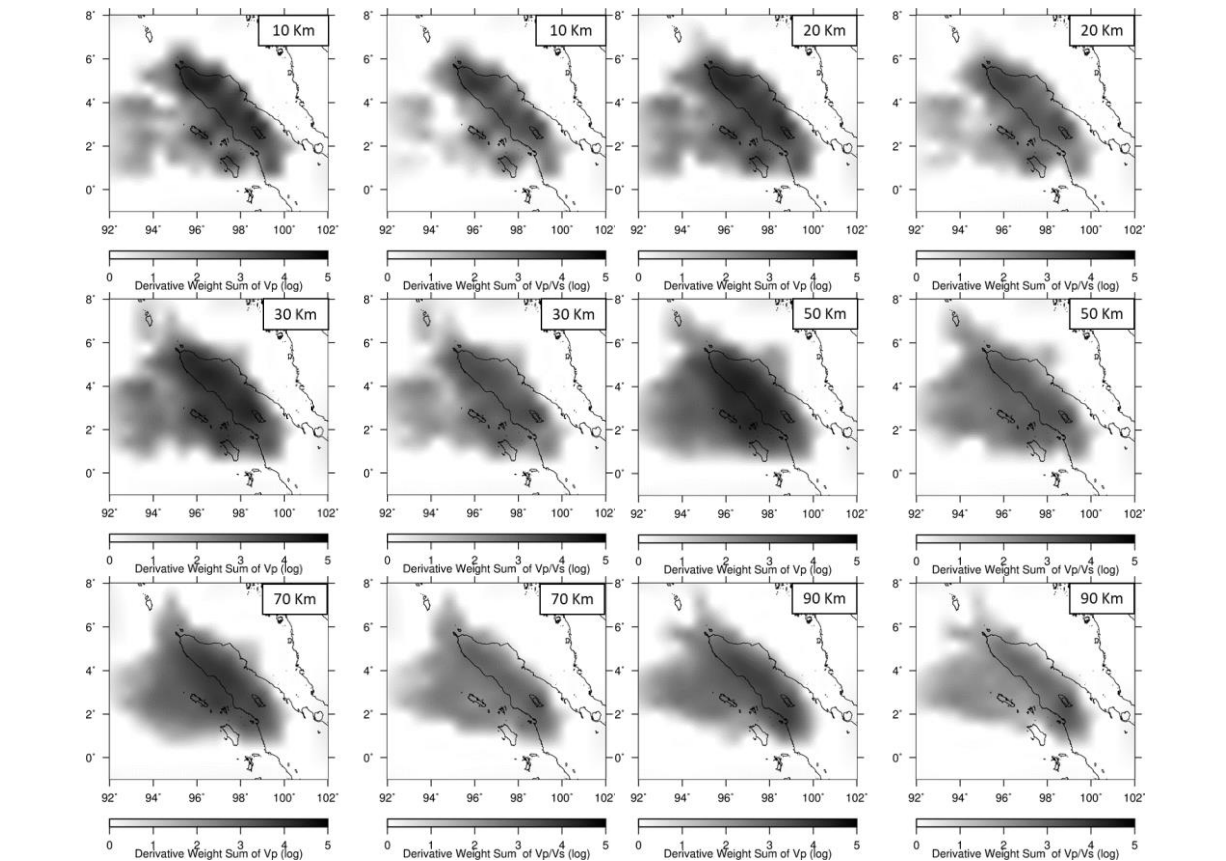
- Asimow, P.D. Partial Melting. In: White, W. (eds) Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. 2016. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_218-1
- Bujung, C. A. (2020). Studi densitas lineament dan pola aliran permukaan daerah manifestasi geotermal di sekitar danau. *Jurnal FisTa: Fisika dan Terapannya*, 1(1), 1-5.
- Gylfy P.H., Axel Bjornsson. 1991. Geophysical Exploration for Geothermal Resources Principles and Application. UNU Geothermal Training Programme Reykjavik. Iceland.
- Hamimu, L., Haraty, S. R., Rubaiyn, A., & Juarzan, L. O. I. (2024, March). Computation and Modelling of Seismic Refraction Tomography for Anisotropic Medium Based on Pseudo Bending Method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2734, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- Indrastuti, N., Nugraha, A. D., McCausland, W. A., Hendrasto, M., Gunawan, H., & Kusnandar, R. (2019). 3-D seismic tomographic study of Sinabung Volcano, Northern Sumatra, Indonesia, during the inter-eruptive period October 2010–July 2013. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382, 197-209.
- Julian, R. (2013). Studi Gelombang Seismik Gempa Vulkanik Gunung Sinabung untuk Menentukan Karakteristik Mekanisme Vulkanik. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 1(02), 53-64.
- Liu, S., Suardi, I., Xu, X., Yang, S., & Tong, P. (2021). The geometry of the subducted slab beneath Sumatra revealed by regional and teleseismic traveltimes tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020169. <https://doi.org/10.1029/2020JB020169>
- Monalia, P. (2011). Analisis Model Kecepatan Berdasarkan Tomografi Refleksi Waktu Tempuh (Travel-Time Tomography Reflection). Tesis, Universitas Indonesia, FMIPA, Jakarta.
- Muttaqy, F., Nugraha, A. D., Mori, J., Puspito, N. T., Supendi, P., & Rohadi, S. (2022). Seismic imaging of lithospheric structure beneath Central-East Java region, Indonesia: relation to recent earthquakes. *Frontiers in Earth Science*, 10, 756806.
- Naryanto, H. S. (2005). Zonasi Kerusakan, Analisis Kegempaan dan Mitigasi Bencana Pasca Gempa Nias, Sumatra Utara 28 Maret 2005. *Alami: Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana*, 10(2), 195620.
- Ramadhan, M., Kristyawan, S., Sembiring, A. S., Daryono, D., & Priyobudi, P. (2020). Uji Resolusi Tomografi Seismik Waktu Tempuh Lokal Menggunakan Dua Input Model Sintetik. *Limits: Journal of Mathematics and Its Applications*, 16(2), 95-104.
- Raharjo, W., Palupi, I. R., & Haty, I. P. (2022). Studi Seismik Tomografi Waktu Tempuh Untuk Identifikasi Zona Lemah dengan Menggunakan Konsep Ray Tracing Berdasarkan Algoritma Dijkstra. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 10(2), 259-268.
- ROHMAINAH, K. (2019). ANALISIS MODEL KECEPATAN 3D PADA GEMPA BUMI DI SELAT SUNDA MENGGUNAKAN LOTOS-12 (LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY SOFTWARE). *Inovasi Fisika Indonesia*, 8(3).
- Siska, D. (2019). Kaitan Antara Teori Gelombang Dan Jalur Rekahan Gempa Bumi Melalui Array Response Function. *TECHSI-Jurnal Teknik Informatika*, 7(1), 156-167.
- Suantika, G. (2009). *Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik 3-D Untuk Delineasi Struktur Internal dan Karakterisasi Sifat Fisis Batuan Di Bawah Gunung Api Guntur*. Bandung, Jawa Barat, Indonesia: institut teknologi bandung.
- Suhendar, R. (2014). Keragaman Geologi Indonesia Warisan Geologi Sumatra. Badan Geologi: Bandung.
- Widiyantoro., dkk. 2000. Improving global shear-wave delay-time tomograph using three-dimensional ray tracing and iterative inversion. *Geophys J. Int.*, No.141: 747-758.
- Wulandari, R., Yudistira, T., Fattah, E. I., & Aulia, A. N. Pemodelan Struktur Kecepatan 3D Gelombang Seismik Daerah Sumatera Barat Menggunakan Data Gempa Bumi Januari 2010-Desember 2017.
- YANUARS, I. S. (2019). ANALISIS MODEL KECEPATAN 3D GELOMBANG SEISMIK DI DAERAH SUMATERA BARAT MENGGUNAKAN LOTOS-12. *Inovasi Fisika Indonesia*, 8(3).

LAMPIRAN

HASIL UJI RESOLUSI DWS

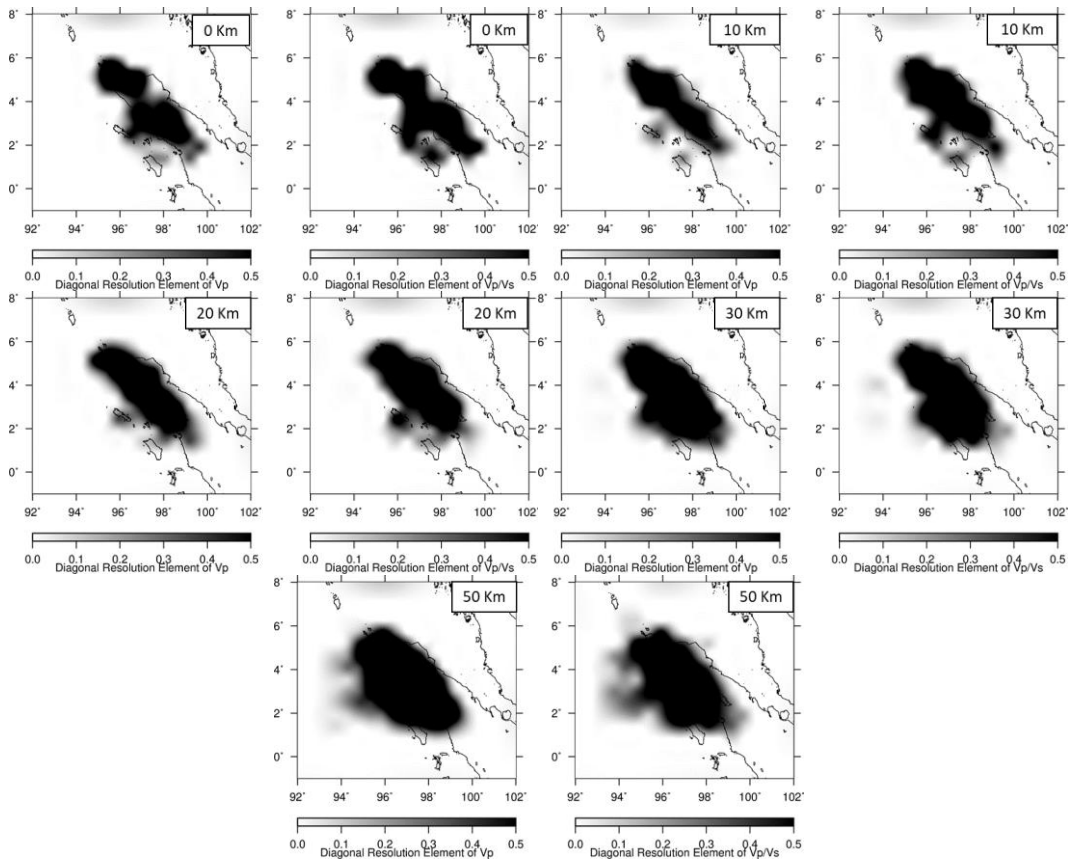


Lampiran 1. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Derivative Weight Sum* (DWS) pada kedalaman 0 km.

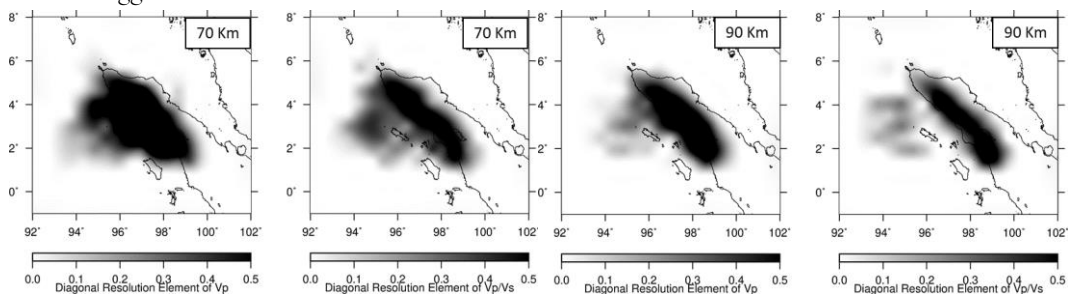


Lampiran 2. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Derivative Weight Sum* (DWS) pada kedalaman 10 km hingga 90 km.

HASIL UJI RESOLUSI DRE

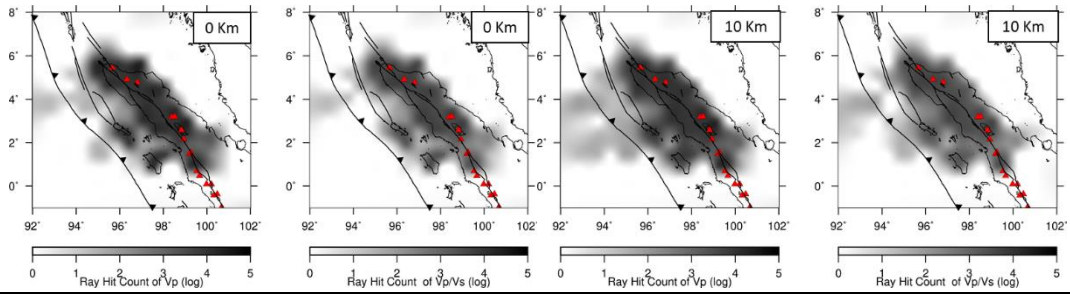


Lampiran 3. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Diagonal Resolution Element* (DRE) pada kedalaman 0 km hingga 50 km.

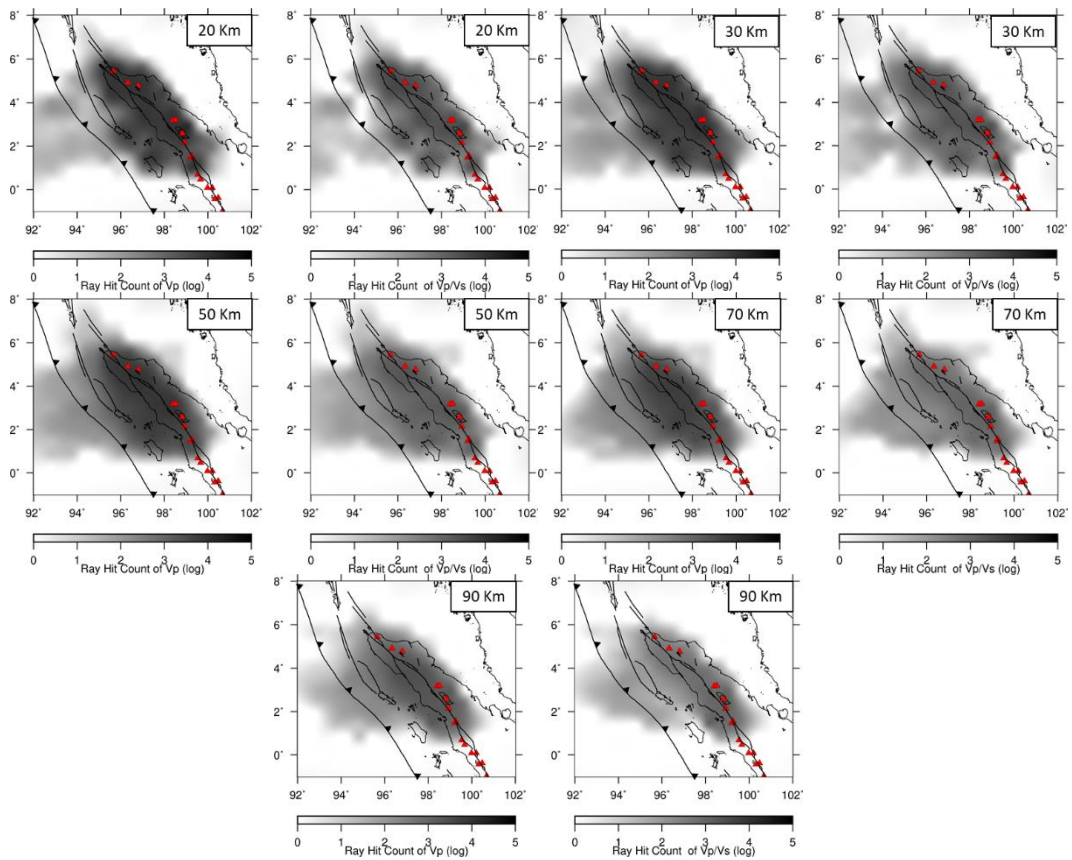


Lampiran 4. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Diagonal Resolution Element* (DRE) pada kedalaman 70 km dan 90 km

HASIL UJI RESOLUSI RHC



Lampiran 5. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Ray Hit Count* (RHC) pada kedalaman 0 km hingga 10km.



Lampiran 6. Plot tomogram horizontal hasil uji resolusi *Ray Hit Count* (RHC) pada kedalaman 20 km hingga 90 km.