

## Model Kecepatan Seismik 1-Dimensi Pada Wilayah Gempa Bumi Tarutung 2022 Mw 5.8

Resa Idha<sup>1</sup>, Endah P. Sari<sup>1</sup>, Syahrul Humaidi<sup>1</sup>, Andrian V. H Simanjuntak<sup>2,3</sup>,  
Umar Muksin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pascasarjana Fisika, Universitas Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

<sup>2</sup>Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

<sup>3</sup>Tsunami and Disaster Mitigation Research Center, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh, Indonesia

E-mail: andrian.simanjuntak@bmg.go.id

### Abstract

On October 1, 2022, an earthquake with a magnitude ( $M$ ) of 5.8 occurred in the Tarutung region, Indonesia and was associated with an active fault at a depth of 10 km. The earthquake fault with dextral mechanism is suitable with the pattern of active fault movement in Sumatra in the Northeast - Southwest direction. A total of 170 aftershocks occurred within a week span with magnitude variations of 1.7 – 4.0. In addition, the Tarutung earthquake was felt by the local peoples with an intensity of IV - VI MMI and caused 1 fatality, 25 injuries, and around 900 houses were damaged. Therefore, this study studies the characteristics of seismicity and damage caused by finding an appropriate 1-Dimensional seismic velocity model. The obtained 1-Dimensional speed model has varying values at a depth of 10 km with a speed of  $\sim 5.5$  km/s and 30 km with a speed of  $\sim 7$  km/s. The 1-D velocity model obtained has a convergent and unique solution with an RMS value  $< 1.0$ . Based on ground motion analysis after relocation, it was found that the high PGA and PGV values were in Tarutung. The PGA results reveal a high percentage value of  $>10\%$  in Tarutung. This is consistent with the damage data and at the same time confirms that Tarutung is in a seismically active area.

**Keywords:** Earthquake, Seismic, PGA, PGV, Seismic Velocity, Hypocenter

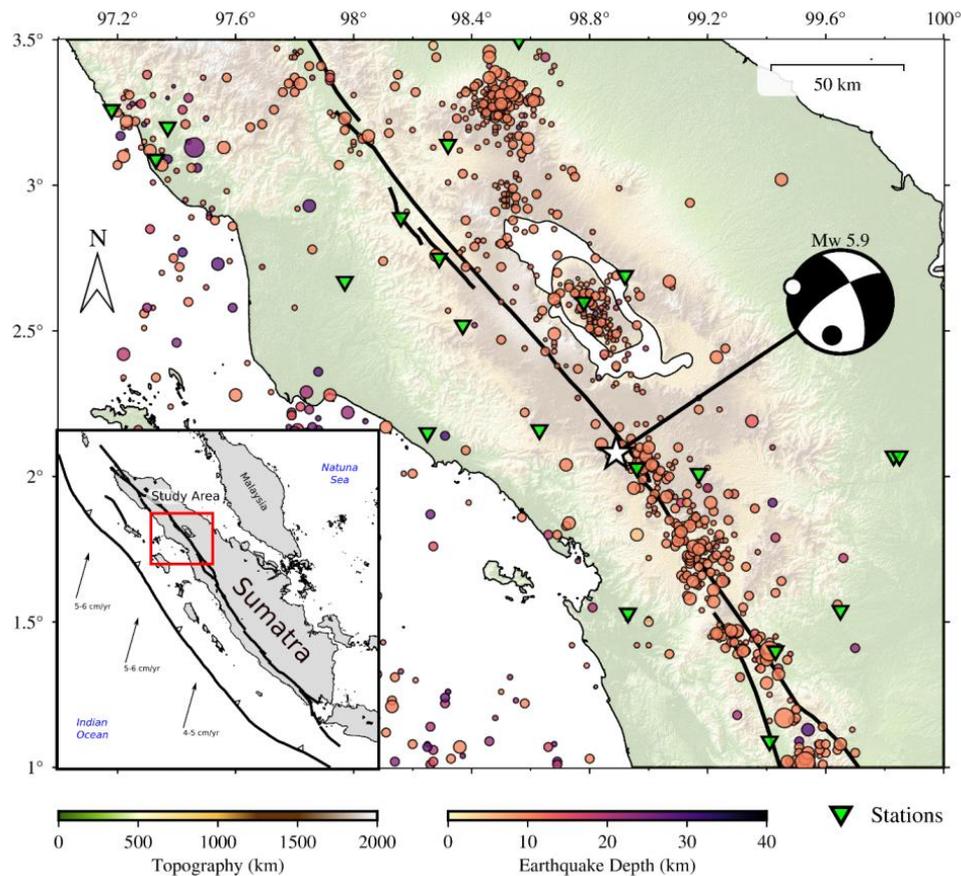
### Abstract

Pada 01 Oktober 2022, gempa bumi magnitudo  $M$  5.8 terjadi di wilayah Tarutung, Indonesia dan berasosiasi dengan sesar aktif pada kedalaman 10 km. Mekanisme patahan gempa bumi pada arah mengangan sesuai dengan pola pergerakan sesar aktif di Sumatra pada arah Timur Laut - Barat Daya. Sebanyak 170 kejadian gempa bumi susulan terjadi dalam waktu rentang seminggu dengan variasi magnitudo 1.7 – 4.0. Selain itu, gempa bumi Tarutung dirasakan oleh masyarakat lokal dengan intensitas IV - VI MMI dan menimbulkan 1 korban jiwa, 25 korban luka, dan sekitar 900 rumah rusak. Oleh karena itu, studi ini mempelajari karakteristik seismisitas dan kerusakan yang ditimbulkan dengan mencari model kecepatan seismik 1-Dimensi yang sesuai. Model kecepatan 1-Dimensi yang diperoleh memiliki variasi nilai pada kedalaman 10 km dengan kecepatan  $\sim 5,5$  km/s dan 30 km dengan kecepatan  $\sim 7$  km/s. Model kecepatan 1-D yang didapat memiliki solusi yang konvergen dan unik dengan nilai  $RMS < 1.0$ . Berdasarkan analisis ground motion setelah relokasi didapatkan hasil bahwa nilai PGA dan PGV yang tinggi berada di Tarutung. Hasil PGA menyatakan nilai persentase yang tinggi yaitu  $>10\%$  di Tarutung. Hal ini bersesuaian dengan data kerusakan yang dan sekaligus mengkonfirmasi bahwa Tarutung berada di wilayah aktif seismik.

**Keywords:** Gempa bumi, Seismik, PGA, PGV, Kecepatan Seismik, Hiposenter

## 1. Pendahuluan

Pada 01 Oktober 2022, gempa bumi merusak dengan magnitudo M 6.0 terjadi di wilayah Tarutung, Indonesia yang diakibatkan oleh aktivitas sesar aktif pada kedalaman dangkal 10 km. Solusi mekanisme patahan yang dirilis oleh *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT) menunjukkan *rupture* (rekahan) terjadi disepanjang sesar yang bergerak menganan pada arah Timur Laut - Barat Daya (NE – SW). Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) merilis pusat gempa terletak pada koordinat 2.11° LU dan 98.91° BT dengan kedalaman 10 km dan berjarak sekitar 15 km pada arah Barat Laut wilayah Tarutung. Secara tektonik, gempa bumi ini disebabkan oleh aktivitas sesar aktif Renun yang merupakan salah satu segmentasi sesar aktif Sumatra. BMKG mencatat bahwa terdapat 170 kejadian gempa bumi susulan dengan variasi magnitudo 1.7 – 4.0 dan kedalaman hiposenter pada kisaran 1 - 10 km.



**Gambar 1.** Peta kegempaan Provinsi Sumatera Utara katalog lima tahun (2017 – 2022) dengan gempa bumi Tarutung 2022 Mw 5,8 (bintang putih dengan mekanisme fokus dextral). Garis hitam adalah sesar aktif Sumatera sedangkan segitiga hijau adalah stasiun seismik jaringan BMKG. Peta inset menunjukkan sistem tektonik di Pulau Sumatera dimana terjadi subduksi di lepas pantai barat dan patahan aktif di daratan.

Selain itu, gempa bumi Tarutung M5.8 dirasakan oleh masyarakat di daerah Tarutung dan Sipoholon dengan intensitas VI MMI, Sipahutar V MMI, Singkil IV MMI dan Gunung Sitoli III MMI. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melaporkan efek dari kerusakan gempa bumi Tarutung dengan 1 korban jiwa, 25 korban luka, dan sekitar 900 rumah dan bangunan mengalami kerusakan di Tarutung. Wilayah Tarutung tergolong menjadi lokasi yang rawan gempa bumi karena posisinya berada di dekat sumber patahan aktif yaitu sesar aktif Renun dan Toru yang bergerak dengan laju geser

~2cm/tahun pada arah mengangan [1, 2]. Secara historis, wilayah ini pernah mengalami gempa bumi pada tahun 1984, 1987, dan 2011 dengan magnitudo 5 – 6 [3, 4, 5].

Beberapa studi telah dipublikasikan seperti, Koulakov dkk. [6] melakukan studi tomografi di sekitar wilayah Toba dengan waktu tempuh gelombang seismik, Sakaguchi dkk. [7] menganalisis struktur dangkal Toba dengan *ambient noise tomography* dan Muksin dkk. [8, 9] membentuk model tomografi seismik wilayah *pull-apart* Tarutung. Namun, belum ada studi yang melakukan penelitian terkait gempa Tarutung 2022 dan implikasinya terhadap bahaya kegempaan. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis lokasi episenter gempa bumi dengan menentukan model kecepatan yang sesuai sehingga lokasi hiposenter lebih akurat. Keakuratan parameter gempa bumi bermanfaat untuk upaya mitigasi gempa bumi dan untuk mengetahui potensi bahaya seismik di wilayah ini. Penentuan lokasi gempa bumi memiliki faktor – faktor yang mempengaruhi keakuratan hasil yang diperoleh yaitu penentuan waktu datang gelombang seismik dan model kecepatan gelombang satu dimensi yang sesuai dengan kondisi lokal.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1. Metode Geiger

Penentuan hiposenter gempa bumi pada penelitian ini menggunakan metode *Geiger* berdasarkan pendekatan linearisasi. Asumsi yang digunakan yaitu parameter hiposenter dan *origin time* observasi  $(x_0, y_0, z_0, t_0)$  yang dibandingkan dengan model perhitungan dan akan menghasilkan residual waktu tempuh [11]. Residual waktu tempuh tersebut merupakan koreksi untuk mendapatkan hiposenter yang lebih baik. Koreksi-koreksi tersebut dibutuhkan untuk memperkecil *error* ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , dan  $\Delta t$ ) yang dapat dihitung dengan deret *Taylor* suku pertama seperti pada persamaan (1)

$$r = \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_i} \Delta x + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_i} \Delta y + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_i} \Delta z + \Delta t \quad (1)$$

Selanjutnya, persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk inversi seperti pada persamaan (2) dan matrik seperti pada persamaan (3)

$$\mathbf{d} = \mathbf{Gm} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_0} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_0} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_0} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \\ \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_n} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_n} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_n} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dengan  $r$  adalah vektor residual,  $G$  merupakan matriks turunan parsial, dan  $x$  merupakan vektor koreksi terhadap lokasi dan *origin time*. Solusi inversi yang digunakan yaitu menggunakan teknik *least squares*. Perkiraan hiposenter dan *origin time* dikoreksi menjadi  $(x+\Delta x, y+\Delta y, z+\Delta z, dan t_0+\Delta t)$ . Kemudian, solusi tersebut digunakan pada tahap iterasi selanjutnya. Proses iterasi terus dilakukan hingga batas yang telah ditetapkan atau menghasilkan residual minimum Havskov, J & Ottemöller, L, [11].

### 2.2. Coupled Hypocenter-Velocity

Metode penentuan model kecepatan sekaligus relokasi posisi gempa bumi dan mengokerski kualitas stasiun seismik menggunakan metode *Coupled Hypocenter-Velocity* [12]. Metode ini memproses secara simultan dengan menggunakan algoritma pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier seperti tidunjukkan pada persamaan (4). Pada persamaan (4),  $t_{obs}$  merupakan waktu tiba gempa bumi pada setiap sensor gempa,  $s$  adalah *origin time*,  $h$  adalah koordinat hiposenter yang telah didapatkan, dan  $m$  adalah model kecepatan yang digunakan.

$$t_{obs} = f(s, h, m) \quad (4)$$

Fungsi  $f$  merupakan fungsi non-linier dari parameter  $h$  dan  $m$  yang tidak diketahui sebelumnya. Dengan mengaplikasikan teori penjalaran gelombang dengan menggunakan model kecepatan awal, waktu tiba gelombang teoritis  $t_{cal}$  untuk setiap pasang stasiun dapat di hitung dengan persamaan (5),

$$t_{cal} = f(h_j, m_k) \quad (5)$$

Dimana,  $h_j$  adalah *origin time* secara teoritis ( $s$ ) dan koordinat hiposenter ( $h$ ), kemudian  $m_k$  adalah bagian dari model kecepatan ( $m$ ). Selanjutnya, nilai  $t_{cal}$  dibandingkan dengan  $t_{obs}$  untuk memperoleh waktu residual  $t_{res}$  dengan pendekatan yang menerapkan ekspansi deret Taylor suku pertama seperti pada persamaan (6):

$$t_{res} = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{j=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_j} \Delta h_j + \sum_{k=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_k} \Delta m_k + e \quad (6)$$

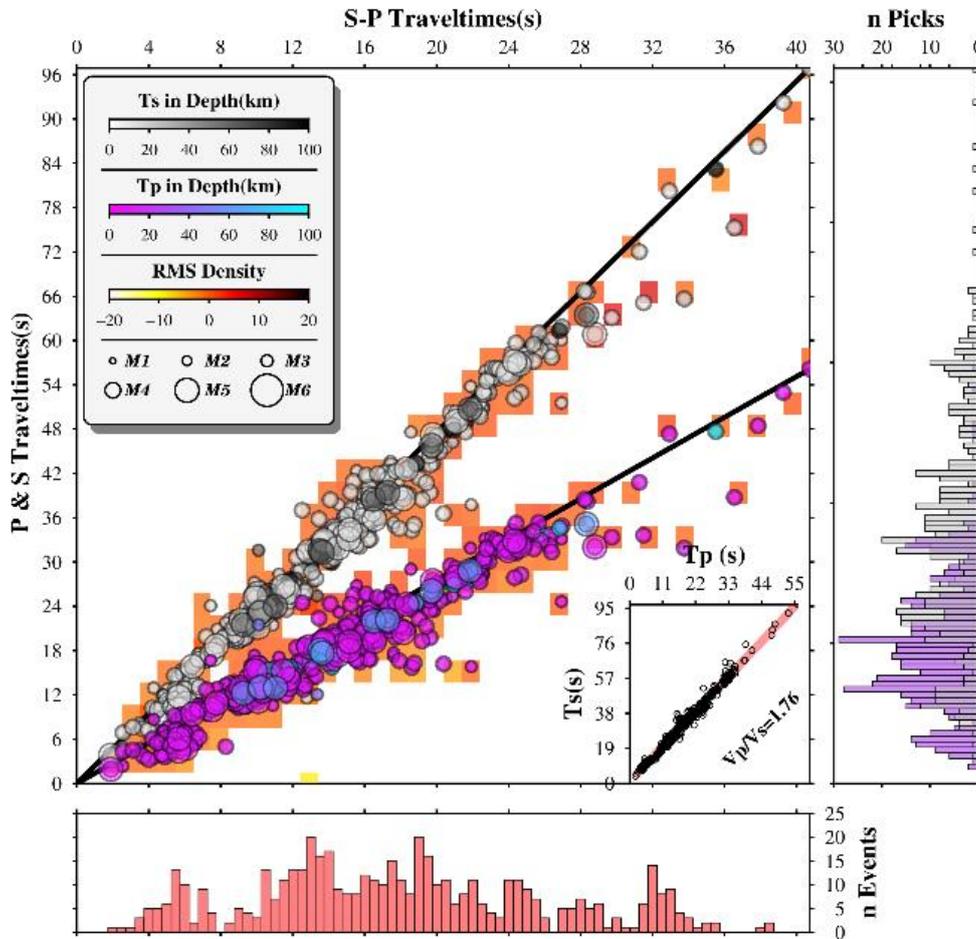
- $t_{obs}$  = waktu observasi
- $t_{res}$  = residual waktu tempuh
- $t_{cal}$  = waktu tempuh kalkulasi;
- $f$  = fungsi terhadap  $s, h, m$  (lihat persamaan 4);
- $e$  = kesalahan (*error*);
- $j$  = jumlah hiposenter;
- $k$  = jumlah stasiun;
- $\Delta m_k$  = parameter model;
- $\Delta h_j$  = parameter hiposenter;

Pada persamaan (6) terdapat variabel  $e$  yaitu *error*, inilah yang digunakan untuk menjadi suatu nilai dalam penentuan koreksi stasiun. Beberapa penelitian menggunakan *Velest* untuk penentuan model kecepatan seismik 1-Dimensi seperti, Simanjuntak dkk [13] melakukan studi relokasi sekaligus penentuan di wilayah Aceh Tenggara dan Muksin dkk [14] melakukan analisis struktur tektonik lokal pada wilayah Aceh Timur dengan menentukan model kecepatan yang sesuai dengan distribusi hiposenter.

### 3. Hasil dan Pembahasan

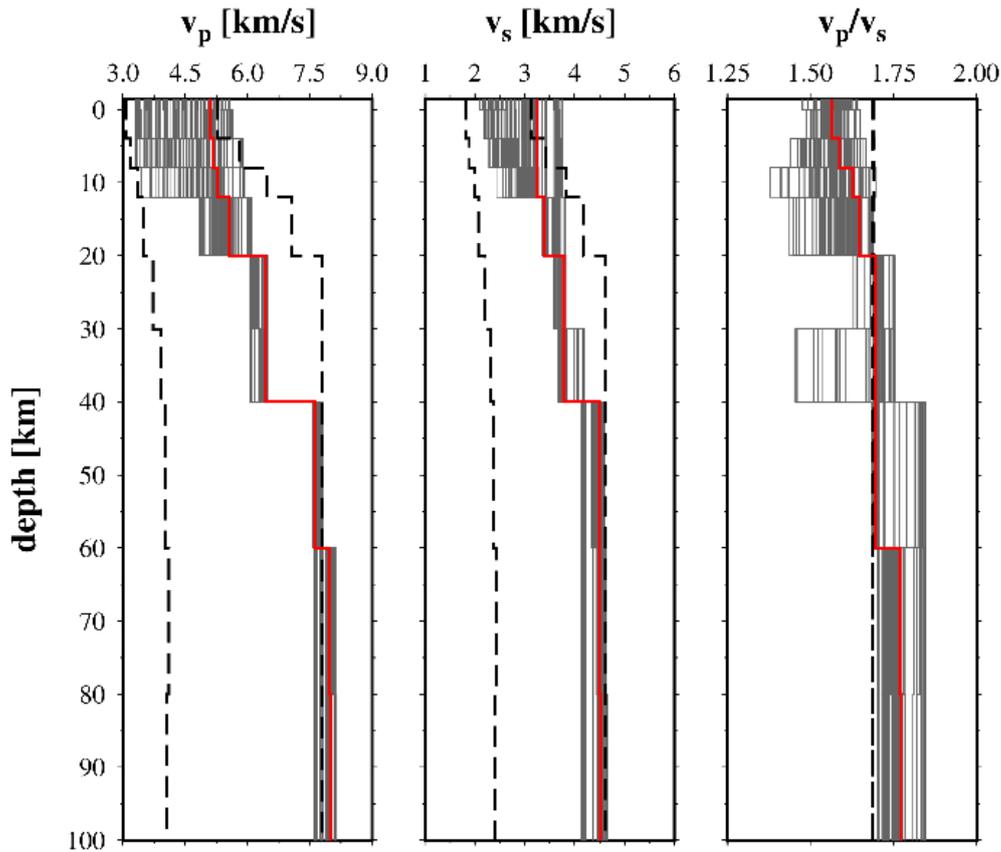
#### 3.1. Model Kecepatan Seismik 1-Dimensi

Salah satu parameter penting dalam menentukan keakuratan lokasi hiposenter gempa bumi yaitu tersedianya model kecepatan gelombang seismik dalam skala lokal atau regional dengan tingkat presisi yang tinggi. Analisis lanjutan sangat diperlukan untuk memahaminya, salah satunya relokasi hiposenter untuk. Relokasi hiposenter digunakan untuk menghitung kembali kesalahan posisi hiposenter dan mendapatkan kembali posisi yang lebih akurat dengan model kecepatan yang sesuai. Pada penelitian ini, analisa dilakukan pada 170 *event* gempa bumi dengan magnitudo M 2.0 – 5.8. Seluruh *event* yang dianalisa memiliki 1011 fase P dan 641 fase S yang direkam oleh 24 stasiun dengan rasio  $V_p/V_s \sim 1,73$  seperti pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Hubungan S-P *traveltime* dengan waktu tiba fase P dan S, dikaitkan dengan RMS, kedalaman dan jumlah gempa dan fase serta nilai  $V_p/V_s \sim 1,76$ . Selisih waktu fase P dan S adalah 40 detik sedangkan rentang waktu tiba P dan S adalah 0 – 96 detik. Tingkat akurasi penentuan fase P dan S adalah -5 dan 5 detik.

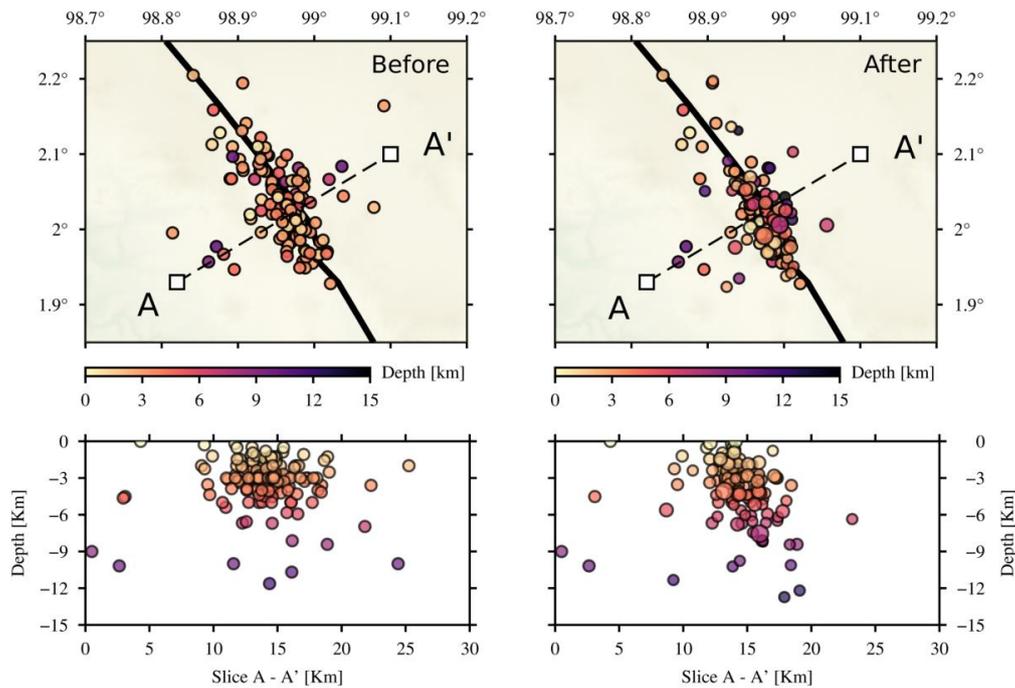
Hiposenter katalog BMKG masih banyak membentuk suatu solusi yang dibuat *fix* dan terperangkap pada kedalaman 10 dan 33 km. Untuk meningkatkan keakuratan lokasi hiposenter, perlu dicari model 1-D yang sesuai. Pada penelitian ini, 30 model apriori diberikan untuk memperoleh hasil yang konvergen ( $RMS < 1.0$ ) dengan 50 iterasi yang dijalankan dengan simultan. Model yang konvergen merupakan model yang paling sesuai untuk hasil relokasi awal dan akhir hiposenter serta untuk penentuan mekanisme sumber gempa bumi seperti pada Gambar 3. Pada Gambar 3, hasil model yang dipilih karena memiliki lebih banyak data dan mewakili seluruh wilayah Tarutung. Model kecepatan yang diperoleh yaitu kecepatan gelombang badan, gelombang P dan gelombang S serta rasio antara gelombang P dan S. Nilai RMS tiap model pada Gambar 3 akan berkurang setiap iterasi, karena melalui proses inversi simultan secara *least-square*.



**Gambar 3.** Hubungan S-P *traveltime* dengan waktu tiba fase P dan S, dikaitkan dengan RMS, kedalaman dan jumlah gempa dan fase serta nilai  $V_p/V_s \sim 1,76$ . Selisih waktu fase P dan S adalah 40 detik sedangkan rentang waktu tiba P dan S adalah 0 – 96 detik. Tingkat akurasi penentuan fase P dan S adalah -5 dan 5 detik.

Nilai RMS berbeda dikarenakan informasi awal yang diberikan bersifat apriori sehingga bisa memiliki nilai yang rendah dan tinggi, RMS yang optimal umumnya  $< 1.0$  s. Untuk relokasi dengan stasiun regional, nilai RMS  $< 1.0$  s sudah sangat bagus, karena jarak stasiun letaknya berjauhan. Nilai kecepatan gelombang seismik akan semakin besar dan berbanding lurus dengan kedalaman, karena material yang dilewati semakin solid dan memberikan lebih jelas posisi hiposenter seperti pada gambar 4. Untuk mendapatkan model 1-dimensi yang sesuai, semua hiposenter harus diseleksi dan sesuai dengan kriteria parameter yang telah ditentukan pada proses inversi. Pada studi ini, kriteria yang dipilih dalam penentuan model terbaik adalah memiliki RMS  $< 1.0$  s sedangkan RMS  $\geq 1.0$  sebanyak 11 gempa dan untuk model 1-D diperoleh dengan RMS = 0.9 s.

Model dengan data sebelum relokasi memiliki jumlah hiposenter yang lebih banyak dengan rms lebih baik dibandingkan dengan data yang belum terrelokasi. Hasil tersebut memiliki perubahan yang lebih *reliable* karena diperoleh dengan data yang lebih banyak dan mewakili hampir semua area. Selain itu, perubahan nilai  $V_p/V_s$  setelah relokasi sekitar 1.73 dengan korelasi  $T_p$  dan  $T_s$  yang sangat bagus. Nilai  $V_p/V_s$  yang memakai data setelah relokasi memiliki nilai misfit yang minimum, korelasi yang sangat baik dengan deviasi yang kecil dan sebaran *outlier*  $T_p$  dan  $T_s$  yang sedikit.

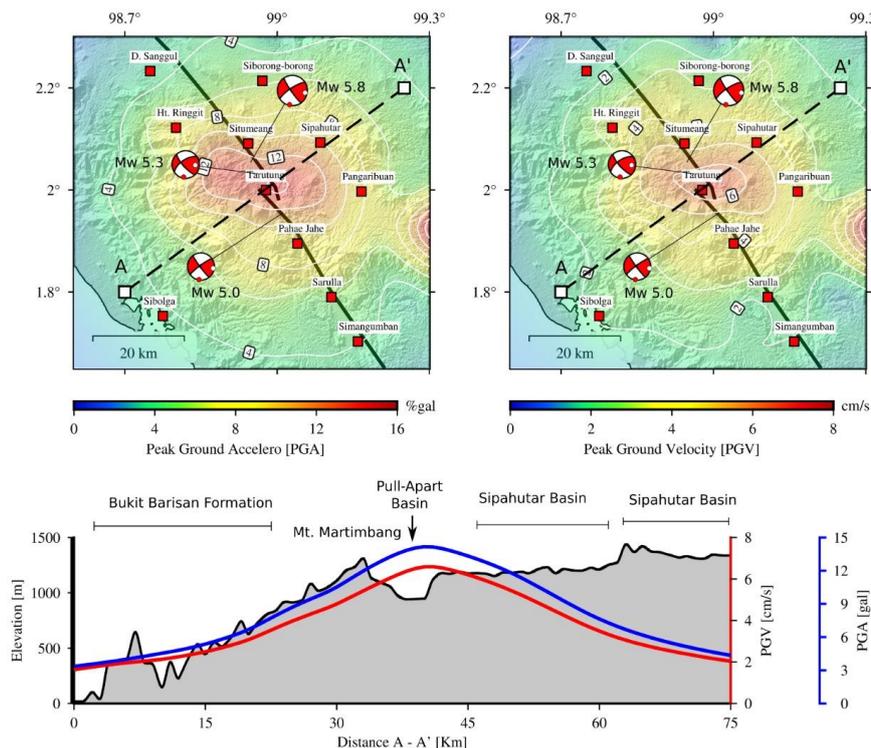


**Gambar 4.** Relokasi gempa bumi Tarutung menggunakan Velest. Bagian kiri merupakan hiposenter yang masih belum terelokasi. Bagian kanan merupakan hiposenter yang telah direlokasi dengan baik dan menghasilkan model kecepatan 1-Dimensi yang sesuai dengan kondisi geologi dan tektonik di wilayah Tarutung.

### 3.2. Model *Ground Motion* gempa Tarutung Mw 5.8

Untuk mengetahui skala kerusakan yang terjadi akibat gempa Tarutung, perhitungan ulang *ground shaking* kembali dilakukan dengan mempertimbangkan laporan kerusakan yang diperoleh dari survey lapangan. Dari hasil perhitungan, model PGA (*Peak Ground Acceleration*) dan PGV (*Peak Ground Velocity*) sesuai dengan intensitas gempa yang dirasakan oleh masyarakat lokal di Tarutung dengan nilai PGA 0 – 15 % gal dan PGV dengan nilai 0 – 8 cm/s<sup>2</sup>. Hasil perhitungan konsisten dengan hubungan empiris yang dikemukakan oleh Worden dkk, [15]. Worden dkk. [15] menunjukkan rentang PGV 6 – 9 cm/s dapat diasosiasikan dengan intensitas kerusakan MMI 6 untuk gempa bumi dari patahan. Selain itu, hasil yang diperoleh juga konsisten dengan PGA 10% gal ~110 cm/s<sup>2</sup> sebagai batas yang diusulkan untuk MMI ~6 [15].

Tercatat, kisaran PGA pada 5 – 10 cm/s<sup>2</sup> digunakan secara global sebagai *treshold* gempa merusak. Secara umum, parameter PGV mungkin memiliki penerapan yang lebih sedikit daripada parameter yang digunakan secara global seperti PGA dan PSA. PGV dapat dimasukkan sebagai parameter gerakan tanah karena berkaitan dengan energi kinetik seismik yang mempengaruhi struktur bangunan. Beberapa contoh penggunaan PGV seperti memperkirakan kekuatan dan kerusakan struktural, mengevaluasi kemungkinan likuifaksi, dan membuat desain bahaya seismik.



**Gambar 5.** (a) Distribusi spasial PGA dan PGV gempa bumi Tarutung berkisar antara 0 – 8 cm/s. (b) Peta spasial PGA berkisar antara 0% – 15% gal yang menunjukkan nilai tertinggi pada wilayah Tarutung > 10% dan sesuai dengan kerusakan sedangkan PGV 0 – 8 cm/s<sup>2</sup> menunjukkan nilai tertinggi pada wilayah Tarutung dengan nilai > 6 cm/s<sup>2</sup>. (c) Profil irisan A – A’ menunjukkan guncangan masif pada wilayah Tarutung dengan nilai PGA dan PGV yang cukup tinggi.

Di sisi lain, Atkinson [16] membandingkan gempa bumi induksi dan alami dan menunjukkan bahwa PGV berpotensi mempengaruhi kerusakan struktur pada rentang frekuensi 0,5–7 Hz, sedangkan PGA dengan frekuensi > 5 Hz. PGA umumnya berkorelasi dengan efek yang dirasakan pada intensitas gempa rendah, sedangkan PGV pada intensitas gempa tinggi. Dengan demikian, PGA dan PGV dianggap sebagai parameter yang paling efektif untuk mengukur kualitas bangunan.

### 3.3. Rekomendasi Gempa Bumi Tarutung

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada gempa bumi Tarutung 01 Oktober 2022, didapatkan rekomendasi sebagai berikut:

- Diperlukan kajian bahaya gempa bumi yang lebih detail untuk meningkatkan kesiapsiagaan pemerintah daerah dan masyarakat dalam menghadapi bencana gempa bumi.
- Diperlukan rencana kontinjensi menghadapi bencana gempa bumi di BPBD setempat.
- Melakukan evaluasi tata ruang wilayah Tarutung dengan memperhatikan kondisi tektonik dan sebisa mungkin menghindari pembangunan di wilayah tanah lunak.
- Menerapkan sistem pengawasan yang tepat dalam melakukan pembangunan gedung terutama gedung vital seperti rumah sakit, kantor pemerintahan, hingga perumahan warga Tarutung.
- Meningkatkan pelaksanaan edukasi terhadap pemerintah daerah dan masyarakat setempat untuk meningkatkan pemahaman dan kapasitas dalam menghadapi bencana gempa bumi sehingga dapat meminimalisir resiko akibat gempa bumi.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat dirumuskan sebagai berikut. Model kecepatan lokal satu dimensi terdiri dari beberapa lapisan.  $V_p$  pada kedalaman 10 km berada pada kecepatan  $\sim 5,5$  km/s.  $V_p$  pada kedalaman 30 km berada pada kecepatan  $\sim 7$  km/s. Model kecepatan 1-D yang didapat memiliki solusi yang konvergen dan unik dengan nilai RMS < 1.0. Berdasarkan analisis *ground motion* setelah relokasi didapatkan hasil bahwa nilai PGA dan PGV yang tinggi berada di Tarutung. Hasil PGA menyatakan nilai persentase yang tinggi yaitu >10% di Tarutung. Hal ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya dan data kerusakan yang diperoleh saat survey lapangan, sekaligus mengkonfirmasi bahwa Tarutung berada di wilayah persesaran.

#### References

- [1] S. Kerry and D. Natawidjaja, "Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 105.B12 (2000): pp 28295-28326.
- [2] R. McCaffrey, "The tectonic framework of the Sumatran subduction zone", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 37, (2009), pp 345-366.
- [3] K. E. Bradley, L. Feng, E. M. Hill, D. Natawidjaja, and K. Sieh, "Implications of the diffuse deformation of the Indian Ocean lithosphere for slip partitioning of oblique plate convergence in Sumatra." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 122(1), (2017), pp 572-591.
- [4] M. Nukman and I. Moeck, "Structural controls on a geothermal system in the Tarutung Basin, north central Sumatra." *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 74, (2013), pp 86-96.
- [5] S. Pasari, A.V. Simanjuntak, A. Mehta, N. Neha, and Y. Sharma, "The current state of earthquake potential on Java Island, Indonesia." *Pure and Applied Geophysics*, vol. 178, (2021), pp 2789-2806.
- [6] S. Pasari, A.V. Simanjuntak, A. Mehta, N. Neha, and Y. Sharma, "Nowcasting earthquakes in Sulawesi island, Indonesia." *Geoscience Letters*, vol. 8, (2021), pp 1-13.
- [7] A. Simanjuntak, U. Muksin, Y. Asnawi, S. Rizal, and S. Wei, "Recent Seismicity and Slab Gap Beneath Toba Caldera (Sumatra) Revealed Using Hypocenter Relocation Methodology." *Geomatics Journal*, vol. 23 no. (99), (2022), pp 82-89.
- [8] S. Pasari, A.V. Simanjuntak, A. Mehta, N. Neha, and Y. Sharma, "A synoptic view of the natural time distribution and contemporary earthquake hazards in Sumatra, Indonesia." *Natural Hazards*, 108, 309-321.
- [9] U. Muksin, A. Arifullah, A. V. Simanjuntak, N. Asra, M. Muzli, Wei, S., ... & Okubo, M. (2023). Secondary fault system in Northern Sumatra, evidenced by recent seismicity and geomorphic structure. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105557.
- [10] A.V. H. Simanjuntak, A. Khalqillah, N. Asra, A. A. Rusdin, N. Sihotang, A.V. Simagnunson, ... & U. Muksin, "A preliminary study of seismic hazard condition for recent earthquake activities on Sumatra Island" In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1109, No. 1, (2022), p. 012033.
- [11] F. Waldhauser, and W. L. Ellsworth, "A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, (2000), pp 1353-1368.
- [12] Aki, Keiti, and Paul G. Richards. *Quantitative seismology*. 2002.
- [13] S. Heimann, M. Isken, D. Kühn, H. Sudhaus, A. Steinberg, S. Daout, ... & Dahm, T. (2018). *Grond: A probabilistic earthquake source inversion framework*.