

Model Mekanisme Patahan Gempa Bumi Tarutung 2022 Mw 5.8

Endah P. Sari¹, Resa Idha¹, Hendro Nugroho¹, Syahrul Humaidi¹, Andrean V. H. Simanjuntak^{2,3*}, Umar Muksin³

¹Pascasarjana Fisika, Universitas Sumatra Utara, Medan, Sumatra Utara, Indonesia

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Medan, Sumatra Utara, Indonesia

³Tsunami and Disaster Mitigation Research Center, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh, Indonesia

E-mail: andrean.simanjuntak@bmk.go.id

Abstract

On October 1, 2022, an earthquake with a magnitude of 5.8 shook the Tarutung area which was generated by an active fault at a shallow depth of 10 km. In this study, relocating the hypocenter and determining the mechanism of the earthquake was carried out to understand the active tectonic structure. The distribution of hypocenter relocation figures a pull-apart pattern at shallow depths. The earthquake mechanism shows a dextral pattern in the Southwest – Southeast direction with a strike of 138° – 158° . The aftershocks are more dominantly distributed in the pull-apart system in the southeastern part and show the greater part of the transfer of seismic static stress to the southeastern side of the Toru fault. The pull-apart tectonic system scheme in the Tarutung basin with secondary faults as extensional faults is proposed to be a fault source model that forms a negative-flower structure geological pattern. The results of this study can be used as a reference for studying the Tarutung tectonic system and applied as a mitigation study.

Keywords: Earthquake, Magnitude, Hypocenter, Fault, Seismic, Geology, Tectonic

Abstract

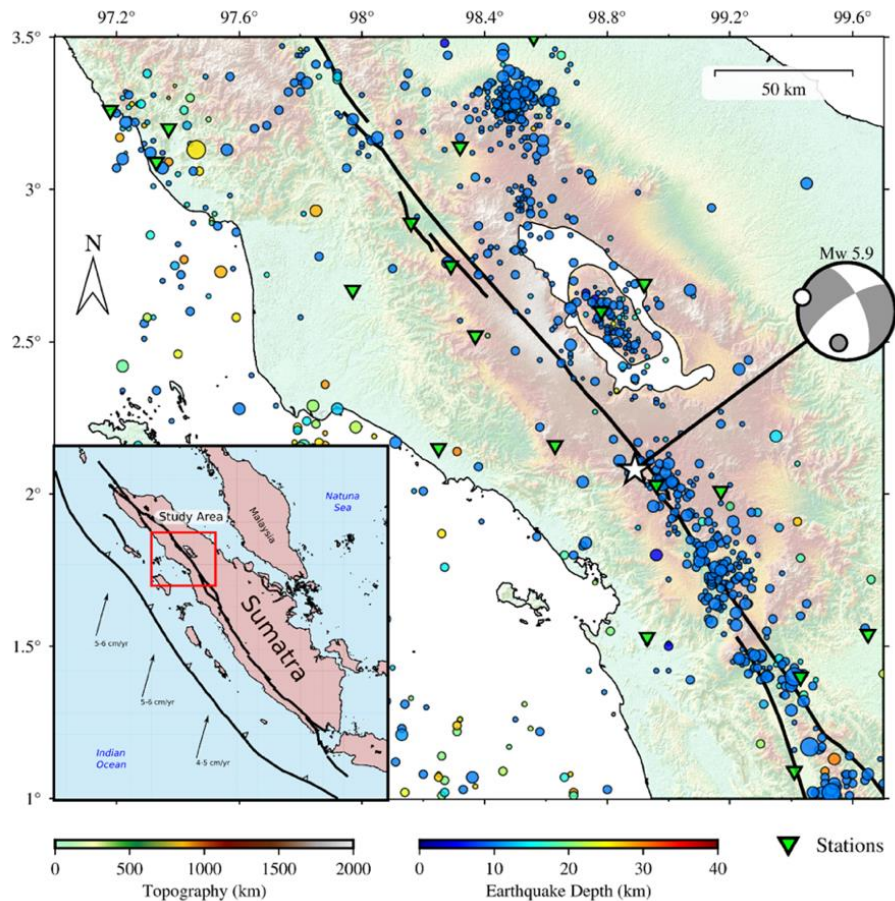
Pada 01 Oktober 2022, gempa bumi magnitudo M 5.8 mengguncang wilayah Tarutung yang dibangkitkan oleh aktivitas sesar aktif pada kedalaman dangkal 10 km. Pada penelitian ini, relokasi hiposenter dan penentuan mekanisme gempa bumi dilakukan untuk memahami struktur tektonik aktif. Distribusi relokasi hiposenter membentuk pola pull-apart pada kedalaman dangkal. Mekanisme gempa bumi menunjukkan pola dekstral pada arah Barat Daya – Tenggara dengan strike 138° – 158° . Gempa susulan terdistribusi lebih dominan di sistem pull-apart pada bagian Tenggara dan menunjukkan sebagian besar transfer stress statis seismik lebih besar ke sisi tenggara sesar Toru. Skema sistem tektonik pull-apart pada basin Tarutung dengan sesar sekunder sebagai sesar ekstensional diusulkan menjadi model sumber patahan yang membentuk pola geologi negative-flower structure. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mempelajari sistem tektonik Tarutung dan diterapkan sebagai studi mitigasi.

Keywords: Gempa, Magnitudo, Hiposenter, Sesar, Seismik, Geologi, Tektonik

1. Pendahuluan

Pulau Sumatera terletak pada pertemuan lempeng tektonik Indo-Australia dan Eurasia [1,2]. Aktivitas tektonik ini menghasilkan sistem tektonik kompleks seperti zona subduksi dan sesar aktif seperti pada Gambar 1. Aktivitas tektonik yang kompleks mempengaruhi proses seismisitas di wilayah Sumatera Utara. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mencatat lebih dari 1000 kejadian gempa bumi setiap tahun terjadi di wilayah Sumatera Utara dan terakhir yaitu gempa merusak Tarutung pada tahun 2022. Pada 1 Oktober 2022, sesar aktif Sumatera kembali menimbulkan gempa cukup besar

yang mengguncang wilayah Tapanuli Utara dan sekitarnya. Menurut BMKG, episenter berada pada koordinat 2°13' LS - 98°89' BT yang berjarak 15 km Barat Laut dari Kabupaten Tapanuli Utara. BMKG melakukan *update* parameter dari yang semula kekuatan M6.0 menjadi M5.8. Guncangan gempa dirasakan di wilayah Tarutung, Sipahutar, Gunung Sitoli, hingga wilayah Aceh meliputi Singkil dan Tapaktuan.



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.

Tarutung sebagai ibukota Kabupaten Tapanuli Utara menjadi salah satu wilayah terdampak yang paling dekat dengan pusat gempa bumi karena dilalui oleh sesar Toru [3, 4]. Selain itu, karakteristik gempa Tarutung dikategorikan sebagai tipe I karena didahului oleh gempa utama (*mainshock*) tanpa gempa pendahulu (*foreshock*) dan diikuti dengan serentetan gempa bumi susulan (*aftershock*) [5, 6]. Studi seismisitas seperti penentuan hiposenter dan mekanisme patahan gempa bumi sangat penting untuk memberikan informasi yang struktur bawah permukaan. Salah satu kendala dalam studi seismisitas adalah ketidakpastian lokasi hiposenter berada jauh dari jalur sesar, sehingga sulit untuk menginterpretasi struktur geologi. Oleh karena itu, perlu dilakukan relokasi yang akurat harus untuk meningkatkan kualitas hiposenter.

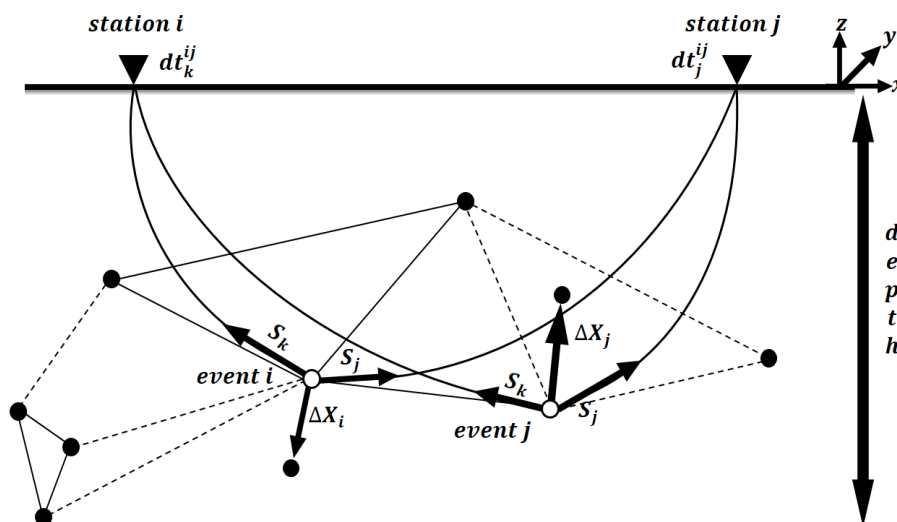
Pada penelitian ini, metode *Double-difference* digunakan untuk merelokasi rangkaian gempa Tarutung. Beberapa studi relokasi telah dilakukan seperti, relokasi seismisitas Danau Toba [7], statistik seismisitas Sumatra [8], seismisitas Aceh Tengah [9], model *seismic hazard* Sumatra [10] namun belum dilakukan pada wilayah Tarutung. Selain itu, mekanisme patahan (*strike*, *dip*, dan *rake*) ditentukan untuk mendukung hasil relokasi

hiposenter. Penentuan mekanisme patahan menggunakan prinsip inversi secara simultan dengan pendekatan probabilistik yang dapat menghitung bidang geometri patahan sekaligus memperbaiki parameter-parameter gempa bumi. Hasil relokasi dan model patahan gempa bumi Tarutung dapat menjadi referensi geologi terbaru dan pertimbangan dalam upaya penanggulangan bencana di wilayah penelitian.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Relokasi Double-Difference

Metode *Double-Difference* merupakan salah satu metode relokasi gempa bumi secara relatif dengan menginversi lokasi hiposenter dari suatu *cluster*. Dalam metode ini, gempa bumi utama atau *master event* tidak dibutuhkan. Hal tersebut yang menjadikan metode ini digunakan secara simultan untuk merelokasi gempa bumi dalam jumlah besar. Terdapat syarat yang harus dipenuhi pada metode ini, yaitu jarak antara dua kejadian gempa bumi yang direlokasi harus sangat kecil jika dibandingkan dengan jarak antara kedua gempa bumi tersebut terhadap stasiun yang merekam.



Gambar 2. Ilustrasi algoritma relokasi gempa bumi *double-difference* yang menggambarkan lingkaran hitam dan putih sebagai sebaran hiposenter yang dihubungkan oleh gempa bumi dengan *cross-correlation* (garis tegas) atau katalog (garis putus-putus). Gempa bumi *i* dan *j* terekam pada stasiun yang sama *k* dan *l* dengan selisih waktu tempuh dt_k^{ij} dan dt_l^{ij} . Karena posisi kedua gempa bumi berdekatan, maka bentuk *raypath* (sumber ke stasiun) cenderung sama yang berarti melalui medium dengan *slowness* hampir sama.

Tujuan algoritma *Double-Difference* adalah untuk meminimalisasi perbedaan waktu tempuh residual untuk pasangan gempabumi pada stasiun yang sama, sehingga diharapkan hasil penyelesaian ini akan bebas dari kesalahan waktu tempuh yang berkaitan dengan keberagaman kecepatan, meskipun masih akan menyisakan kesalahan acak yang terdapat pada lokasi awal [7, 9]. Perbedaan antar selisih waktu tempuh observasi dan kalkulasi dari dua data gempa (dt_k^{ij}) [11] pada Gambar 2 diatas dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut:

$$dt_k^{ij} = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (1)$$

Persamaan (1) mengekspresikan waktu tempuh residual (dt_k^{ij}) dari dua gempa bumi *i* dan *j* di stasiun pengamat *k* berdasarkan perbedaan waktu tempuh observasi dan kalkulasi untuk dua gempa. Pada Gambar 2, T_k^i adalah waktu tempuh gempa *i* ke stasiun *k*, sedangkan T_k^j adalah waktu tempuh gempa *j* ke stasiun *k*. Jika *slowness* tidak konstan

akibat hubungan antara waktu tempuh dan lokasi gempa bumi tidak linier, Persamaan (1) dapat dilinierkan menggunakan ekspansi *Taylor* orde pertama sebagai berikut:

$$dt_k^{ij} = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} dx^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} dy^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} dz^i + d\tau^i - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} dx^j - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} dy^j - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} dz^j - d\tau^j \quad (2)$$

Parameter-parameter hiposenter direpresentasikan oleh x , y , z , dan τ yang merupakan posisi dan waktu awal. Waktu tempuh residual ditentukan oleh perubahan ke-4 parameter untuk setiap 2 gempa yang terlibat dalam pasangan gempa bumi. Distribusi hiposenter gempa bumi yang berkelompok (klaster) pada umumnya memberikan informasi penting terkait keberadaan suatu patahan. Klaster-klaster hiposenter didapatkan dengan relokasi sehingga diperoleh hasil relokasi yang baik dan nilai galat yang kecil.

Setiap gempa bumi memiliki informasi waktu tempuh yang saling terhubung satu sama lain dan tercatat pada stasiun yang sama, sehingga dapat dikoreksi secara silang antara waktu dan tempat. Hal ini bermaksud mengukur tingkat kemiripan banyak gempa bumi yang terekam pada satu stasiun. Kemiripan tersebut akan mempengaruhi klaster-klaster hiposenter setelah relokasi. Algoritma pada program HypoDD menggunakan metode inversi *least-square*. Error hiposenter pada program HypoDD menggunakan metode *trial and error* sehingga didapatkan residual waktu tempuh terkecil.

2.2. Inversi Momen Tensor

Mekanisme sumber gempa bumi dapat digambarkan secara konvensional dengan analisis polaritas gelombang P yang terekam pada seismometer, melalui teknik *trial-error* tetapi terlalu subjektif. Cara yang lebih obyektif yaitu dengan *moment tensor* pada sinyal *displacement*. *Displacement* memiliki hubungan linier terhadap *moment tensor* sehingga memungkinkan untuk inversi gelombang seismik. Aki dan Richard [12] menyatakan *moment tensor* didefinisikan oleh pasangan gaya (*force couples*) dan dipol gaya (*force dipole*) yang dalam bentuk matriks dapat dinyatakan pada persamaan (3).

$$M = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{yx} & M_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sembilan komponen dasar pada tensor momen di tunjukan dengan matrik 3x3. Inversi yang digunakan adalah jenis inversi linier yang bersifat *over determined*, dimana jumlah data jauh lebih banyak daripada jumlah parameter model. Faktor sumber diindikasikan oleh tensor (m), *Green function* dinyatakan bentuk seismogram yang dihasilkan oleh sumber m , sedangkan respon instrumen dihilangkan, sehingga *displacement* (u) pada suatu stasiun pengamat di permukaan bumi dinyatakan sebagai persamaan (4).

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^6 G_{ij}(t)m_j \quad (4)$$

Apabila dinyatakan dalam bentuk matriks, persamaan (4) menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} \\ G_{31} & G_{23} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & G_{n4} & G_{n5} & G_{n6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u = G m \quad (6)$$

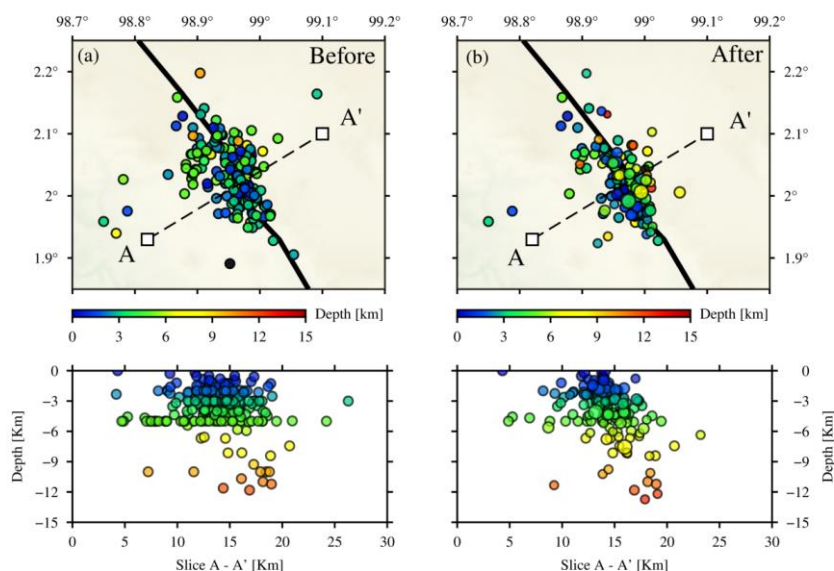
dimana u adalah jumlah data, m adalah parameter model, dan G adalah matriks ($N \times M$). Parameter model tidak dapat diperoleh langsung dari inversi matriks G karena ordo matrik tidak sama ($N \neq M$) sehingga solusi persamaan menjadi sebagai berikut.

$$m = (G^T G)^{-1} G^T u \quad (7)$$

Arah bidang patahan yang diperoleh dari hasil inversi *momen tensor* memerlukan semua komponen yang terekam pada setiap stasiun yang diinversi. Sinyal yang teramati akan disesuaikan dengan bentuk sinyal sintetis dengan cara mengatur domain frekuensi.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini, model kecepatan seismik 1-Dimensi dari Simanjuntak dkk [7] digunakan untuk proses komputasi pada HypoDD untuk merelokasi hiposenter gempa. Relokasi final diperoleh dengan pengaturan parameter yaitu jarak separasi antar hiposenter 40 km, jumlah maksimum gempa sebanyak 10, jarak maksimum pasangan gempa dalam 20 km dan hiposenter dan *centroid* 0 – 80 km. Hiposenter katalog BMKG masih banyak membentuk suatu solusi yang dibuat *fix* dan terperangkap pada kedalaman 10 dan 33 km sehingga perlu direlokasi untuk membuat variasi kedalaman lebih baik.

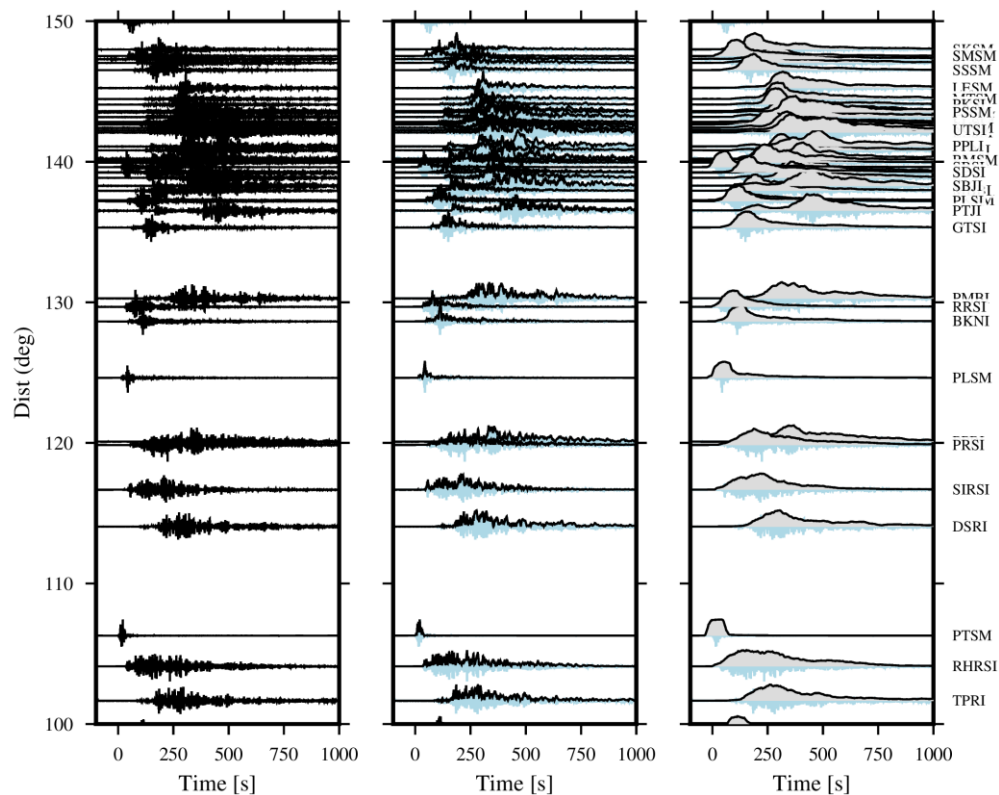


Gambar 3. Perbandingan sebelum (kiri) dan hasil relokasi *HypoDD* pada wilayah Tarutung (kanan).

Beberapa gempa dengan magnitudo yang kecil tereduksi karena total stasiun observasi yang sedikit tidak memenuhi kriteria. Selain itu, hiposenter yang terlalu menyebar dan sangat lemah untuk dianggap sebagai pasangan juga akan tereduksi. Sebanyak 124 gempa bumi berhasil direlokasi dengan nilai RMS seperti pada Gambar 3. Pada Gambar 3, distribusi hiposenter gempa bumi menyebar sebelum diterapkan komputasi HypoDD dengan nilai kedalaman yang berpola *fix-depth* pada nilai 5 km. Perubahan terlihat setelah relokasi HypoDD dengan distribusi yang lebih terkonsentrasi pada kelurusan atau lineasi sesar, meskipun beberapa gempa masih ada yang berada di luar garis sesar.

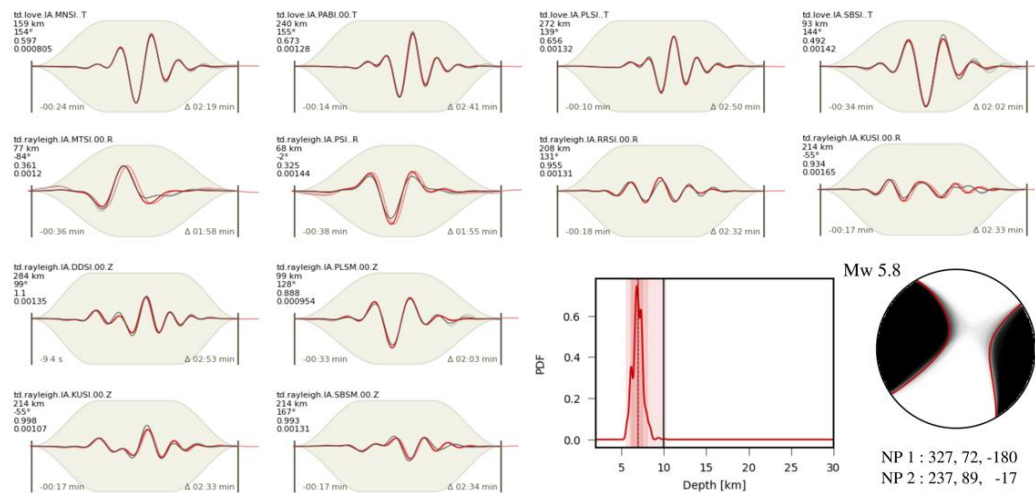
Perubahan nilai kedalaman hiposenter juga bisa dilihat secara jelas pada penampang vertikal. Gempa-gempa lebih dominan berada pada kedalaman < 8 km, serta pola *fix-depth* sudah tidak lagi terlihat. Pembobotan secara apriori diberikan dengan nilai bobot < 0.5 yang berarti data observasi sudah sangat bagus dan sesuai dengan perhitungan. Waktu jeda (*delay*) antara waktu observasi dan perhitungan sudah mendekati 0 (mirip) dan hasil relokasi bisa dikatakan baik. Selain itu, hasil relokasi menunjukkan rms yang sangat baik dengan jarak klaster-*centroid* tidak terlalu jauh. Mekanisme sumber gempa bumi

didapatkan dari pencocokan dan inversi gelombang badan (*body-wave*) dan permukaan (*surface-wave*) secara terpisah atau yang lebih dikenal dengan perangkat yang mampu mengkarakterisasi mekanisme sumber gempa kuat bernama *Grond* [13].



Gambar 4. Contoh rekaman sinyal salah satu gempa pada jaringan stasiun BMKG (IA) untuk komponen vertikal. Pada bagian kiri, rekaman asli gempa bumi Tarutung, dan bagian tengah merupakan hasil *envelope* untuk melihat dominan amplitudo gelombang dan bagian kanan merupakan proses *smoothing* untuk melihat durasi waktu gempa.

Gelombang permukaan lebih mudah untuk dibuat model sintetiknya, dikarenakan gelombang permukaan memiliki amplitudo yang besar dan durasi yang panjang sehingga sering digunakan dalam proses inversi mekanisme gempa bumi. Perangkat *Grond* mampu banyak data kejadian seismik secara paralel, sehingga mempunyai tingkat efektifitas yang bisa dipertanggungjawabkan. Untuk mendapatkan mekanisme sumber yang representatif, diperlukan rekaman gelombang seismik yang baik sebagai data masukannya. Gelombang yang dipakai yaitu rekaman pada setiap stasiun dengan jarak 0 – 4° seperti pada Gambar 4 yang masih dalam satuan kecepatan. Pada proses inversi ini, data *velocity* dari setiap sensor seismometer harus diintegral untuk mendapatkan sinyal *displacement*. Sinyal *displacement* kemudian dianalisis secara inversi untuk mendapatkan model patahan yang sesuai. Selain itu, sinyal *displacement* diberikan koreksi respon instrumen untuk mendapatkan sinyal seismik yang asli berasal dari sumber.

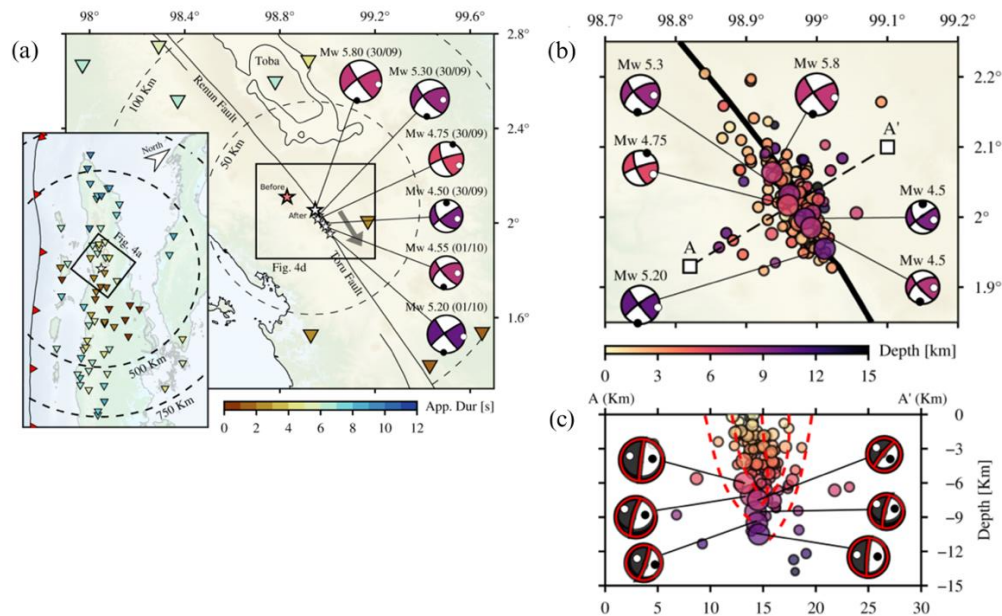


Gambar 5. Dua contoh hasil inversi sinyal untuk *event* terbesar (gempa utama M5.8) dan error nilai. Kedalaman gempa bumi berubah dari yang sebelumnya 10 km menjadi ~6-7km setelah inversi. Model patahan yang diperoleh yaitu pola menganan (dekstral).

Koreksi instrumen diberikan untuk menghindari sinyal seismik dari beberapa stasiun yang telah mengalami atenuasi dan amplifikasi. Proses inversi moment tensor menggunakan sinyal *displacement* lebih mempresentasikan proses sumber gempa bumi seperti ditunjukkan pada gambar 5. Hasil pencocokan sinyal seismik observasi (garis hitam) dan sintetik (garis merah) pada Gambar 5 menunjukkan hasil yang dominan mirip pada kasus gempa bumi M5.8. Gelombang permukaan yang dimodelkan dari 12 (duabelas) stasiun pada gempa bumi utama M5,8, terdapat 3 (tiga) stasiun yakni stasiun MNSI, PABI, PLSI tampak paling bersesuaian mendekati 100% kecocokannya, selain itu stasiun lainnya juga mempunyai kecocokan yang bisa diandalkan.

Grafik *probability density function* (PDF) menunjukkan unsur kedalaman sumber gempa bumi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai tertinggi terlihat pada kedalaman sekitar 6 – 7 km yang artinya gempa bumi bersumber dari kerak bumi yang dangkal, atau biasanya akibat aktivitas persesaran. Hal ini sebagai bukti bahwa gempa bumi Tarutung 2022 dibangkitkan oleh gerakan persesaran dangkal yang berada di sekitar wilayah Tapanuli Utara – Sumatra Utara. Hasil analisis *bootstrap* berhasil memperbaharui parameter hiposenter, yang mana lokasi episenter gempa bumi utama bergeser ~15 km ke arah Tenggara, sementara kedalaman sumber gempa menuju kedalaman ~6 km. Momen seismik untuk gempa utama (*main-shock*) adalah 1.2×10^{16} Nm, sedangkan 6.4×10^{15} Nm dan 3.2×10^{15} Nm masing-masing untuk Mw 5.3 dan Mw 5.1.

Parameter mekanisme sumber yang diperoleh dari hasil inversi sinyal gempa bumi atau *waveform* dengan menggunakan durasi gempa 20 - 50 detik, yaitu arah garis sesar atau *strike* berkisar 138° - 158° , *dip* 51° - 85° dan *rake* 146° - 172° pada bidang nodal 1. Untuk bidang nodal 2, parameter sesar yang dihasilkan dari inversi berupa *strike* antara 233° - 250° , *dip* 57° - 83° dan *rake* 5° - 39° . Skala kekuatan magnitudo momen terbesar Mw 5.8 yang terjadi pada saat gempa utama, sedangkan yang lain bervariasi antara 4.50 – 5.30 yang merupakan rangkaian gempa susulan dengan kategori cukup kuat yang bersumber pada kedalaman 6.0 – 10.5 km seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. (a) Solusi mekanisme patahan dari gempa bumi utama dan gempa susulan terpilih $M \geq 4,5$; (b) Seismisitas gempa bumi dan solusi mekanisme gempa bumi pada *pull-apart system* di sebelah selatan segmen sesar Toru; (c) Penampang vertikal distribusi A-A' menggambarkan sistem lokal yang disebut struktur bunga negative (*negative flower structure*) yang berada di bawah sistem tarik-menarik (*pull-apart system*).

Gambar 6 (a) dan (b) menggambarkan sebaran gempa susulan ($M_{4,5} - M_{5,3}$) terkonsentrasi pada zona dimana segmen Toru dan segmen Renun bertemu. Arah *strike* menunjukkan pola yang seragam yaitu arah Barat Daya – Tenggara sesuai dengan pergeseran sesar Sumatera. Dari hasil yang diperoleh, sistem tektonik menggambarkan suatu *pull-apart basin*. Selain itu, hasil relokasi hiposenter mengkonfirmasi keberadaan *pull-apart*. Kluster gempa dan mekanisme patahan gempa bumi membentuk struktur sesar pada arah barat laut (NW) – tenggara (SE) yang berlokasi di zona ekstensional sesar Toru dan Renun.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, beberapa kesimpulan dapat dirumuskan sebagai berikut. Distribusi hiposenter rangkaian gempa Tarutung Mw 5,8 sebelum direlokasi dengan HypoDD memiliki pola menyebar dengan kedalaman dominan *fix-depth* pada 5 km. Lokalisasi yang dilakukan kembali lebih meningkatkan kualitas distribusi hiposenter gempa Tarutung dengan $rms < 0.5$ s. Solusi mekanisme sumber gempa bumi menunjukkan pola mekanisme sesar dekstral pada arah Barat Daya – Tenggara (NW – SE) dengan *strike* $138^\circ - 158^\circ$. Gempa susulan terdistribusi lebih dominan di sistem *pull-apart* pada bagian Tenggara dan menunjukkan sebagian besar transfer stress statis seismik lebih besar ke sisi tenggara sesar Toru. Skema sistem tektonik *pull-apart* pada basin Tarutung dengan sesar sekunder sebagai sesar ekstensional diusulkan menjadi model sumber patahan yang membentuk pola geologi *negative-flower structure*. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mempelajari sistem tektonik Tarutung dan diterapkan sebagai studi mitigasi.

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. Simagnunsong, ... & 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, Keiiti, 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*.