

# RELOKASI SUMBER GEMPA DI DAERAH SUMATERA BAGIAN UTARA MENGUNAKAN HASIL INVERSI SIMULTAN RELOKASI DAN KECEPATAN GELOMBANG P TIGA DIMENSI

## RELOCATION OF EARTHQUAKES IN NORTHERN SUMATRA USING THE SIMULTANEOUS INVERSION OF RELOCATION AND THREE-DIMENSIONAL P-WAVE VELOCITIES

Jajat Jatnika<sup>1\*</sup>, Andri Dian Nugraha<sup>2</sup>, Wandono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta 10720

<sup>2</sup> Program Studi Magister Sains Kebumihan Fakultas Ilmu Teknologi dan Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

\*E-mail: jajat.jatnika@bmkgo.id

Naskah masuk: 13 Maret 2015, Naskah diperbaiki: 19 Desember 2015, Naskah diterima: 22 Desember 2015

### ABSTRAK

Penujaman miring antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia memberikan pengaruh yang besar terhadap kondisi tektonik dan vulkanik di Sumatera bagian utara. Subduksi tersebut mengakibatkan terbentuknya deretan gunung api dan zona sesar yang terbentang di pulau Sumatera. Seismisitas yang tinggi di wilayah Sumatera bagian utara tidak hanya diakibatkan oleh pengaruh dari subduksi saja, namun dapat juga diakibatkan karena keberadaan sesar aktif dan aktivitas gunung api yang berada di darat pulau Sumatera. Oleh karena itu perlu dilakukan penentuan sumber gempa yang akurat dan presisi. Salah satu faktor yang mempengaruhi penentuan sumber gempa adalah model kecepatan yang digunakan. Dengan menggunakan program Simulps12 yang secara simultan menghitung kecepatan 3-D gelombang P dengan hasil relokasi gempanya, diharapkan dapat menentukan sumber gempa sesuai dengan kondisi tektonik sebenarnya. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah waktu tiba gelombang P dan parameter gempa dari katalog BMKG 2009-2012 dan katalog PASSCAL Februari-Mei 1995. Penjejakan sinar gelombang menggunakan metode pseudo-bending sedangkan metode LSQR teredam digunakan dalam teknik inversinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempa hasil relokasi mengalami perubahan posisi baik secara horisontal maupun secara vertikal. Beberapa gempa menunjukkan perubahan jarak horisontal yang besar yaitu sekitar 40-70 km. Sedangkan secara vertikal hampir setengah data mengalami perubahan kedalaman hingga 60 km. Setelah relokasi terlihat distribusi gempa dangkal di darat lebih berimpit dengan zona sesar Sumatera. Hal ini juga mengindikasikan bahwa zona sesar Sumatera sangat aktif dimana kedalaman gempa yang terjadi tidak lebih dari 50 km.

**Kata kunci:** Relokasi, sumber gempa, Sumatera bagian utara, SimulPS12

### ABSTRACT

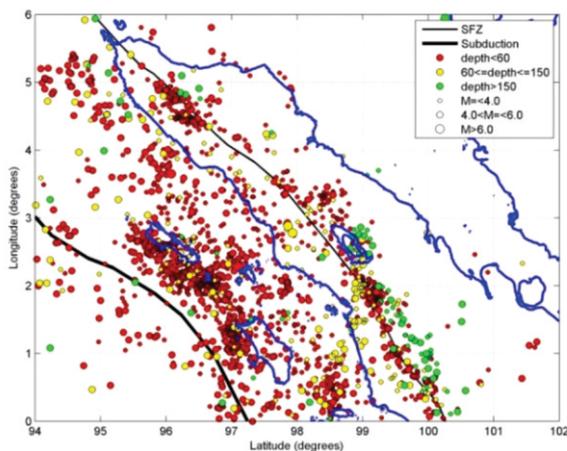
*The oblique subduction between the Indo-Australian plate and Eurasian plate in northern Sumatra gives a great influence on volcanic and tectonic conditions. The subduction resulted in the formation of a row of volcanoes and fault zones that lie on the island of Sumatra. The high seismicity in the northern Sumatra region is not only caused by the subduction alone but there are fault active and volcanoes. Then the precise determination of the earthquake source in accordance with the actual conditions needs to be done. One factor that affects the determination of earthquakes is velocity model. By using Simulps12 program that simultaneously calculates velocity models 3-D and earthquake relocation, it was expected to determine the source of the earthquake in accordance with the actual conditions. The data used is the P wave arrival time and the parameters of the earthquake in catalog of BMKG 2009-2012 and catalog of PASSCAL February-May 1995. Ray tracing in this studies was using pseudo-bending method, while the damped LSQR method was using inverse techniques. The results showed that the earthquake relocation results change positions either horizontally or vertically. Some earthquake showed large changes in horizontal distance of about 40-70 km vertically while almost half of data changes to 60 km depth. After the relocation, the distribution of shallow earthquakes inland coincides with the Sumatra fault zone. It also shows that Sumatra fault zone is highly active where the depth of the earthquake occurred not exceeding 50 km.*

**Keywords:** Relocation, Earthquakes Source, Northern Sumatra, SimulPS12

## 1. Pendahuluan

Salah satu wilayah di Indonesia yang merupakan daerah dengan potensi bahaya gempa terbesar adalah Sumatera bagian utara. Selama kurun waktu dekade belakangan ini telah terjadi beberapa kejadian gempa besar dan merusak di wilayah tersebut. Hal itu disebabkan karena wilayah Sumatera berada di atas penujaman dua lempeng besar yang saling berinteraksi yaitu lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Akibat dari penujaman tersebut maka daerah Sumatera memiliki beberapa sesar aktif (zona sesar Sumatera) dan berasosiasi dengan keberadaan gunung berapi. Dengan demikian Sumatera bagian utara merupakan wilayah dengan kondisi tektonik aktif dan kompleks yang ditunjukkan oleh tingkat seismisitas yang tinggi (Gambar 1).

Studi tentang seismisitas berkaitan erat dengan penentuan posisi sumber gempa. Ketelitian penentuan sumber gempa merupakan salah satu elemen dasar untuk memperoleh hasil yang maksimal dalam studi selanjutnya, salah satunya adalah studi tomografi. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi akurasi penentuan posisi sumber gempa, diantaranya adalah konfigurasi stasiun, penentuan waktu tiba gelombang (*picking*), *phase* gelombang, dan model kecepatan gelombang yang digunakan. Oleh karena itu penentuan posisi sumber gempa harus terus dilakukan *updating* (relokasi), hal ini bertujuan untuk mendapatkan posisi sumber gempa yang lebih tepat. Studi seismisitas termasuk relokasi di dalamnya telah banyak dilakukan diantaranya oleh Engdahl dkk [1], Nugraha dkk [2], Nugroho dkk [3], Ramdhan dkk. [4] dan sakti dkk [5]. Sedangkan untuk daerah Sumatera telah dilakukan penelitian oleh Pesicek dkk. [6] dan Wulandari [7].

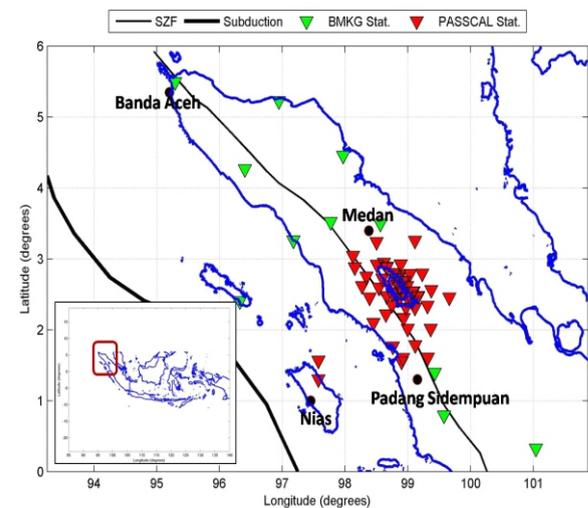


Gambar 1. Seismisitas Sumatera bagian utara periode 2009-2012, sumber: BMKG

Pada penelitian ini digunakan program SimulPS12 [8], dalam program tersebut dilakukan inversi simultan antara penentuan model kecepatan 3-dimensi dan relokasi sumber gempa. Hasil relokasi tersebut merupakan hasil dari *update* model kecepatan tiga dimensi. Sehingga dengan merelokasi sumber gempa diharapkan dapat menganalisis kondisi tektonik di wilayah tersebut sesuai dengan kondisi sebenarnya.

## 2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data waktu tiba gelombang P, jaringan stasiun dan parameter gempa di wilayah Sumatera bagian utara (0 LU - 6 LU dan 94 BT - 102 BT). Data tersebut berasal dari katalog gempa BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) dari bulan Januari tahun 2009 hingga bulan Desember tahun 2012 dan katalog gempa PASSCAL (*Program for Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere*) yang dioperasikan selaman bulan Februari-Mei 1995. Jaringan seismograf pada data katalog gempa BMKG dalam penelitian ini digunakan stasiun yang berada di wilayah penelitian dengan jumlah 15 stasiun pengamatan. Sedangkan gempa yang tercatat dalam katalog BMKG berjumlah 1016 kejadian dan katalog PASSCAL sebanyak/sejumlah 571 kejadian gempa. Jaringan PASSCAL menggunakan 40 buah seismograf digital yang dipasang di 47 lokasi, dimana beberapa seismograf dipindahkan lokasinya sebelum pengambilan data terakhir. Distribusi stasiun BMKG dan PASSCAL ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi stasiun pencatat gempa, segitiga terbalik hijau merupakan stasiun BMKG dan segitiga terbalik merah menunjukan distribusi jaringan stasiun PASSCAL.

Menurut Thurber [9] waktu tempuh ( $T_{ij}$ ) gelombang *body* dari sumber gempa  $i$  ke stasiun pengamat  $j$  dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$T_{ij} = \int_{source}^{receiver} u ds \quad (1)$$

Dimana  $u$  adalah perlambatan ( $slowness=1/v$ ) dan  $ds$  merupakan elemen panjang segmen sinar seismik. Dengan demikian persamaan (1) merupakan persamaan yang tak linier. Nilai pengamatan waktu tiba  $t_{ij}$  bisa dituliskan

$$t_{ij} = \tau_i + T_{ij} \quad (2)$$

dan  $\tau_i$  adalah *origin time* atau waktu terjadinya gempa di sumber. Dalam tomografi parameter yang diketahui hanya lokasi stasiun pencatat dan waktu tiba gelombang. Sedangkan koordinat pusat gempa ( $x_1, x_2, x_3$ ), *origin times*, lintasan-gelombang dan perlambatan tidak diketahui. Data waktu tiba hasil pembacaan *picking* gelombang P disebut sebagai waktu tiba observasi ( $t_{ij}^{obs}$ ). Sedangkan waktu tiba kalkulasi ( $t_{ij}^{cal}$ ) dihitung dari persamaan (1) dan (2) dengan menggunakan sumber gempa dan *origin time* awal serta menggunakan *initial* model kecepatannya.

Selisih antara data observasi dengan data perhitungan waktu tiba disebut sebagai residual

$$r_{ij} = t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{cal} \quad (3)$$

Nilai residual dihubungkan dengan peturbasi terhadap hiposenter dan stuktur kecepatan dengan menggunakan ekspansi Taylor dapat dituliskan sebagai:

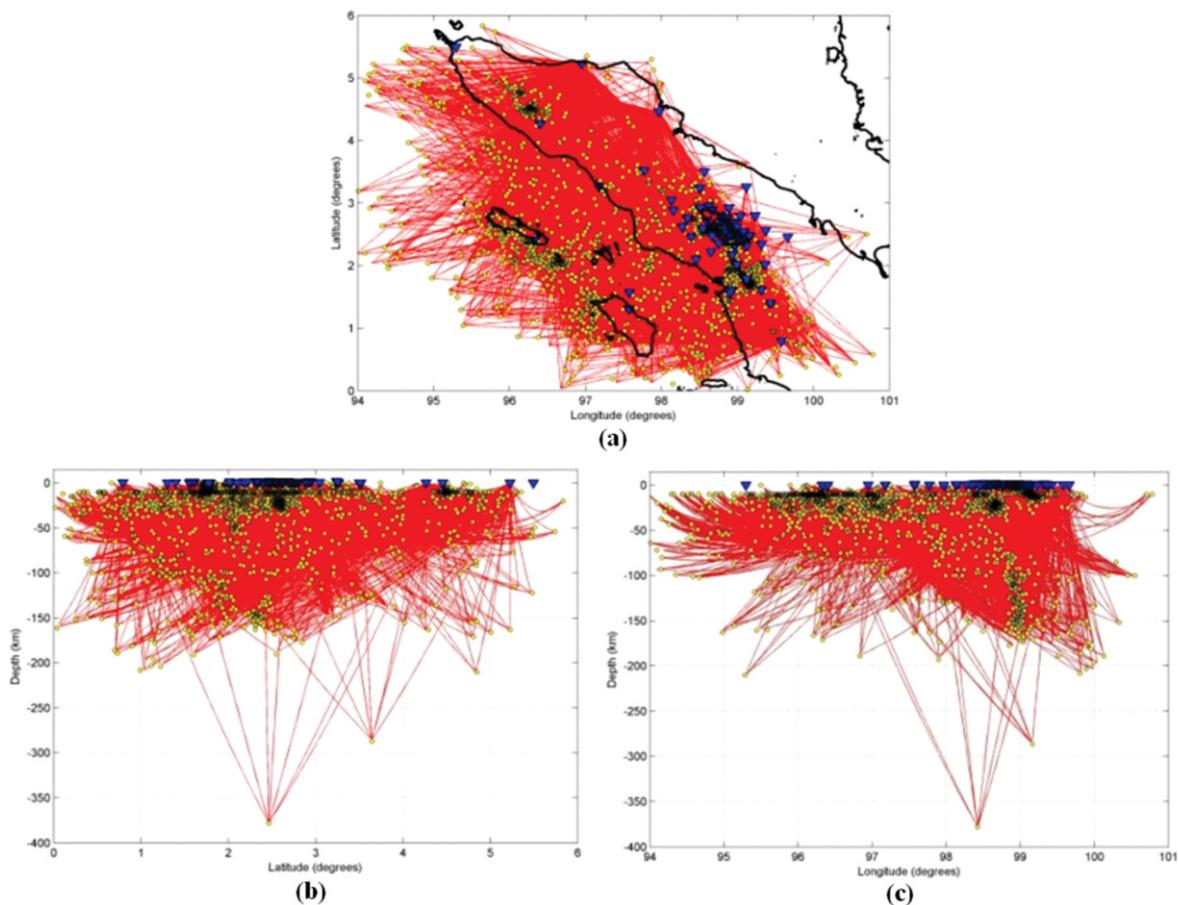
$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} \Delta x_k + \Delta \tau_i + \int_{source}^{receiver} \delta u ds \quad (4)$$

Turunan parsial hiposenter  $\partial T_{ij} / \partial x_k$  sebanding dengan komponen vektor dari lintasan *slowness* nya pada pusat gempa:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} = -\frac{1}{v} \left( \frac{dx_k}{ds} \right)_{source} \quad (5)$$

Jika dimasukkan komponen struktur kecepatan, maka persamaan (4) bisa dituliskan menjadi :

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} \Delta x_k + \Delta \tau_i + \sum_{l=1}^L \frac{\partial T_{ij}}{\partial m_l} \Delta m_l \quad (6)$$



Gambar 3. Penjejakkan sinar (garis merah) dengan teknik *pseudo-bending* berdasarkan distribusi gempa (bulatan kuning) dan stasiun (segitiga terbalik biru). a) secara horizontal; b) secara vertikal arah Utara-Selatan; c) Secara vertikal arah Timur-Barat.

Dimana  $m_i$  merupakan parameter model kecepatan. Turunan parsial model kecepatan  $\partial T_{ij}/\partial m_i$  pada dasarnya merupakan integral garis sepanjang lintasan sinar yang mewakili hubungan setiap parameter model  $m_i$  terhadap waktu tiba  $T_{ij}$ . Secara sederhana persamaan (6) dapat dituliskan dalam bentuk matriks:

$$r = H \Delta h + M \Delta m \quad (7)$$

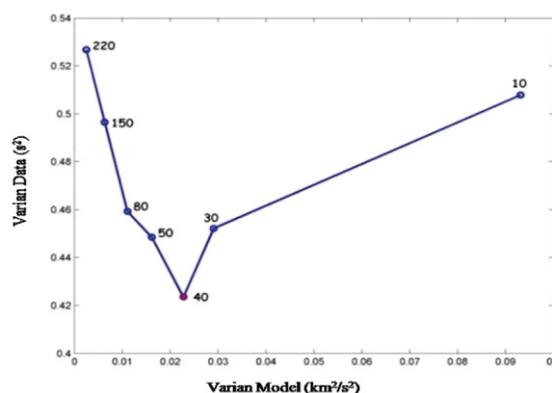
$H$  merupakan matriks turunan parsial yang berhubungan dengan hiposenter dan waktu terjadinya gempa.  $\Delta h$  sebagai vektor perturbasi dari hiposenter dan waktu terjadinya gempa.  $M$  adalah matriks yang berisi turunan parsial terhadap model (panjang lintasan) dan  $\Delta m$  merupakan perturbasi model *slowness*. Sedangkan  $r$  adalah vektor nilai residual.

Dalam penelitian ini pengolahan datanya menggunakan *software* SimulPS12 yang secara simultan menghitung struktur kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) serta menghitung relokasi sumber gempa. Untuk penjejak seismiknya menggunakan teknik *pseudo-bending* [10]. Hasil dari penjejak sinar seismik (Gambar 3) menunjukkan bahwa densitas sinar yang melewati wilayah studi di kedalaman kurang dari 50 km sangat rapat, sedangkan di kedalaman lebih dari 120 km menunjukan jumlah sinar mulai berkurang. Model kecepatan awal dalam penelitian ini menggunakan model kecepatan 1-dimensi Ak 135.

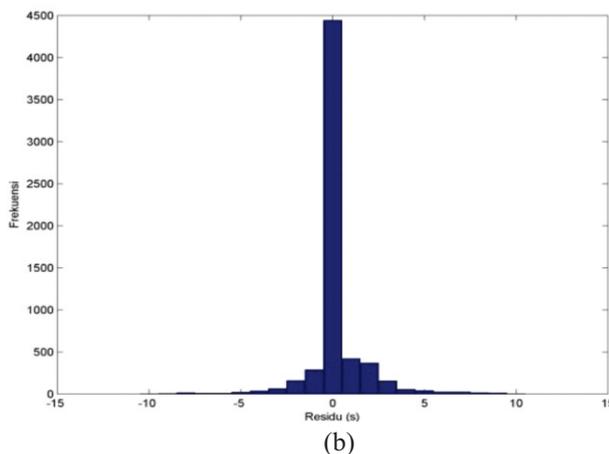
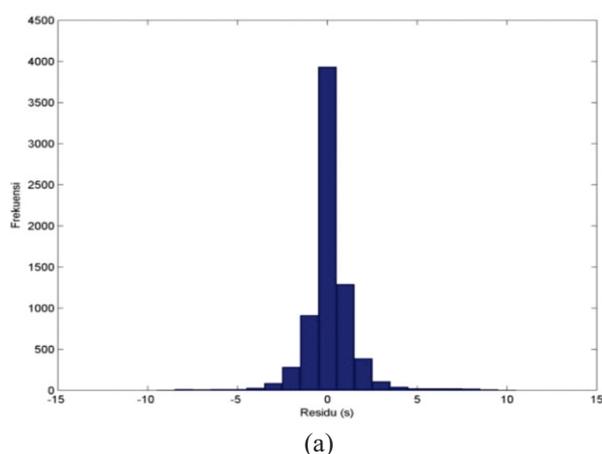
Dengan menggunakan LSQR teredam untuk teknik inversinya, maka perlu dicari nilai redaman yang optimum untuk meminimumkan kesalahan data dan kesalahan model. Hal tersebut dapat diperoleh dengan mencari nilai optimum dari kurva "trade off" antara varian data dengan varian model. Pemilihan

nilai redaman yang tepat dapat menurunkan nilai varian data dan meningkatkan varian model [2.1]. Maka dipilih nilai optimum 40 sebagai nilai redaman (*damping*)  $V_p$  (gambar 4) dan 50 sebagai *damping* stasiun.

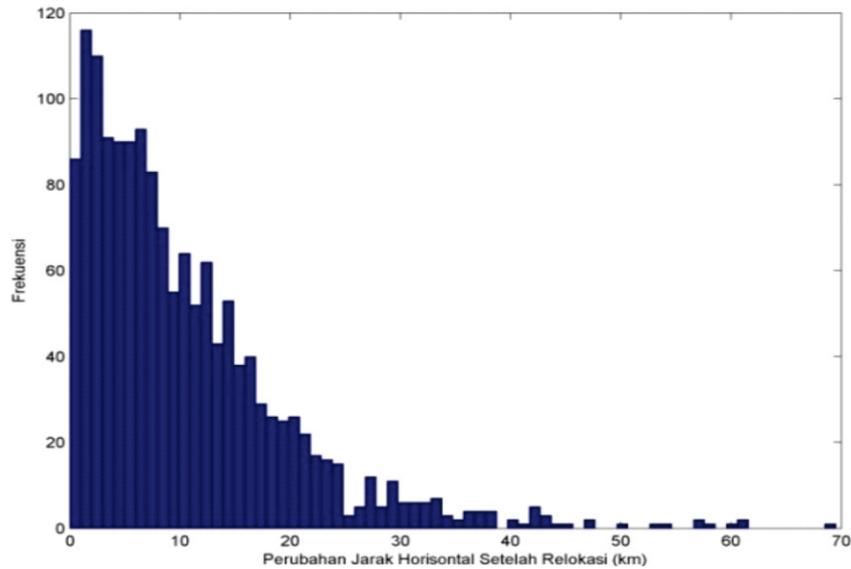
Sebagai validasi dari penelitian relokasi sumber gempa dibuat perbandingan antara frekuensi nilai residual sebelum dan setelah relokasi sumber gempa. Hal ini dilakukan untuk menguji sejauh mana keakuratan hasil relokasi. Salah satu faktor relokasi semakin baik adalah jika frekuensi nilai residual yang mendekati nol setelah proses relokasi bertambah besar. Karena nilai waktu residual mendekati nol menunjukkan model perhitungan dan kenyataan tidak jauh berbeda. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa frekuensi nilai residual yang mendekati atau bernilai nol setelah relokasi menjadi lebih banyak, sedangkan nilai yang menjauhi nol jumlahnya semakin sedikit (Gambar 5).



Gambar 4. Kurva "trade off" antara varian data dan varian model dengan menggunakan nilai *damping*  $V_p$  yang berbeda. Nilai *damping* 40 (bulatan merah) merupakan *damping* yang dipilih dalam penelitian ini



Gambar 5. Histogram perbandingan nilai residual (selisih antara waktu tempuh observasi dengan waktu tempuh perhitungan) gelombang P sebelum relokasi (a) dan setelah relokasi (b).



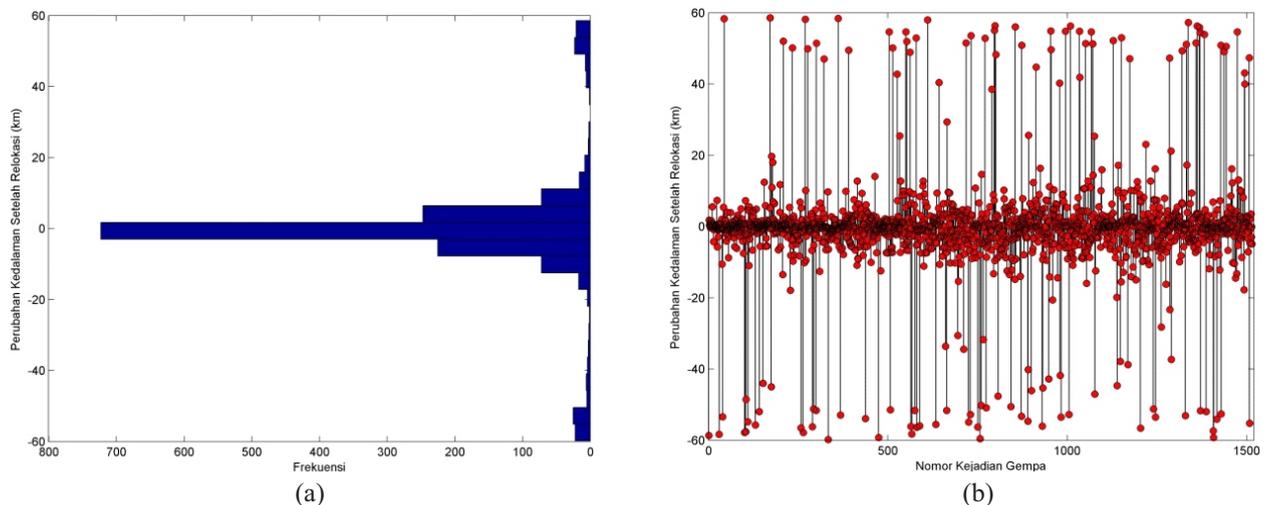
Gambar 6. Histogram perubahan jarak horisontal setelah relokasi

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penentuan hiposenter dalam katalog PASSCAL menggunakan program HYPO71 dengan model kecepatan 1-D, sedangkan katalog BMKG menggunakan program SeiscomP dengan model kecepatan global IASP91. Hasil relokasi menggunakan kecepatan 3-D gelombang P terdapat perubahan lokasi secara horisontal. Bahkan setelah proses relokasi beberapa kejadian gempa mengalami perubahan jarak lebih dari 40 km hingga 70 km (Gambar 6). Sedangkan secara vertikal hampir setengah dari data mengalami perubahan kedalaman dengan radius hingga 60 km. Kemudian di dalam katalog BMKG banyak kejadian gempa yang masih menggunakan kedalaman *fixed depth* sebesar 10 km. Namun setelah proses relokasi dilakukan, lebih dari

30% kejadian gempa dengan kedalaman *fixed depth* dapat berubah (Gambar 7).

Secara horisontal sebaran gempa setelah relokasi menunjukkan pola yang lebih mampat (fokus), khususnya gempa yang terkonsentrasi di daerah zona sesar Sumatera. Terlihat juga perbedaan yang cukup signifikan di sekitar zona subduksi, dimana sebaran gempa setelah relokasi memiliki kesesuaian dengan pola subduksi secara horisontal, hal ini berbeda dengan sebaran gempa sebelum dilakukan relokasi. Namun sebaran gempa sebelum dan setelah relokasi sama-sama menunjukkan pola kedalaman yang sesuai dengan pola subduksi, dimana gempa dangkal berada di BaratDaya, gempa menengah berada di sekitar ujung sebelah Barat pulau Sumatera sedangkan gempa dalam berada di tengah pulau Sumatera (Gambar 8).



Gambar 7. Histogram perubahan kedalaman setelah relokasi. Nilai negatif menunjukkan posisi sumber gempa berpindah lebih dalam sedangkan nilai positif berpindah lebih dangkal. (a) Perbandingan jumlah gempa yang berubah. (b) Perubahan kedalaman pada setiap kejadian gempa.

Secara tektonik pulau Sumatera merupakan zona busur Sunda bagian barat. Sumatera merupakan wilayah aktif yang berada pada zona kerak kontinental yang terangkat, bagian dari sesar besar Sumatera, dan zona subduksi miring. Penunjaman lempeng Indo-Australia dari arah Selatan di busur ini membuat sudut miring dengan arah subduksi sebesar  $N 30^{\circ} E$  di sebelah barat Sumatera sehingga kedalamannya terbatas dan berdampak terjadinya sesar sepanjang pulau. Zona sesar Sumatera tersebut melintang dari Aceh sampai Selat Sunda dengan panjang sekitar 1900 km. Sieh dan Natawidjaya [11] membagi zona sesar Sumatera menjadi 19 segmen, 9 diantaranya berada di lintang positif dan memiliki *length* segmen dan *slip rate* yang paling besar diantara segmen lainnya.

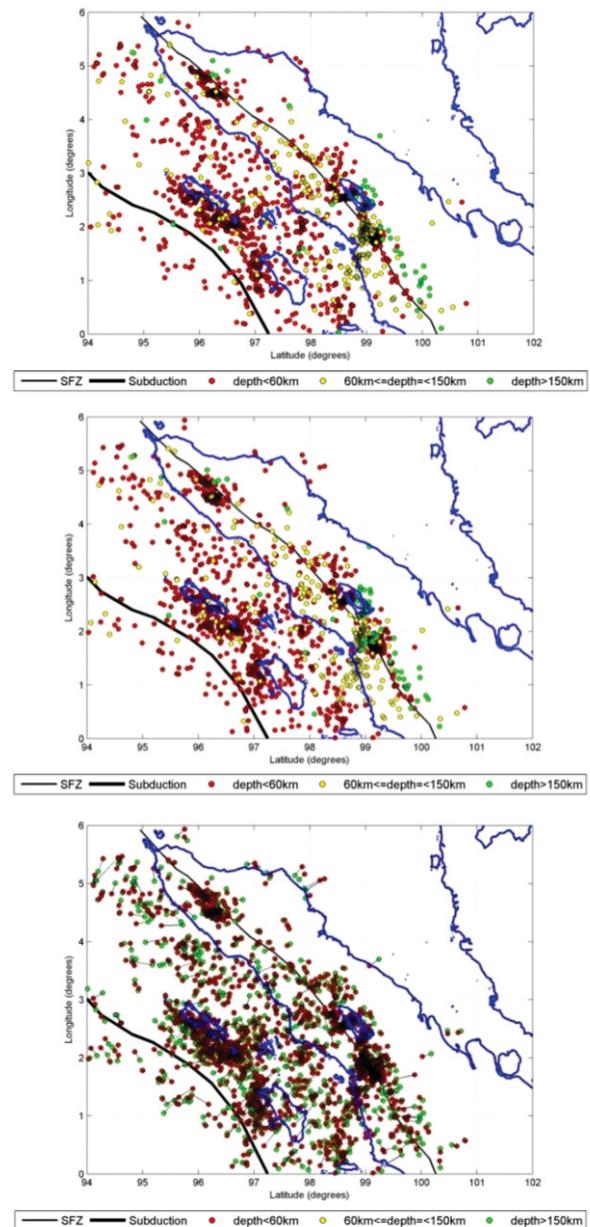
Gambar 9 menunjukkan seismisitas berdasarkan kedalaman, yaitu dangkal ( $< 60$  km), menengah ( $60 - 150$  km) dan dalam ( $> 150$  km). Gempa-gempa dangkal di darat diakibatkan oleh aktifitas dari zona sesar Sumatera, hal ini dapat diasosiasikan dengan kelurusan posisi sumber gempa yang berhimpit dengan zona sesar Sumatera. Dalam gambar 8a terlihat seismisitas hasil relokasi yang menunjukkan kelurusan dengan beberapa segmen zona sesar Sumatera. Segmen Aceh ditunjukkan dengan kotak A dimana distribusi gempanya terfokus di daerah segmen tersebut. Kotak B menunjukkan segmen Tripa, pada segmen ini sedikit sekali data yang dapat mempersentasikan pola kelurusan seismisitas. Untuk segmen Renun ditunjukkan oleh kotak C dimana pola seismisitasnya berimpit dengan zona sesarnya, karena segmen ini berdekatan dengan Kaldera Toba maka beberapa gempa *low frequency* diidentifikasi tersebar di bawah Toba [12]. Pola kelurusan lainnya diperlihatkan oleh kotak D yang merupakan segmen Toru dan segmen Barumun yang ditunjukkan oleh kotak E.

Pada gambar 10 ditunjukkan irisan vertikal distribusi gempa sebelum dan setelah relokasi dari penampang A-A', B-B' dan C-C'. Ketiga irisan vertikal tersebut baik sebelum dan sesudah relokasi menunjukkan pola subduksi yang cukup jelas. Selain itu kedalaman sumber gempa di wilayah Sumatera bagian utara tidak lebih dari 200 km. Hal ini sesuai dengan studi dan penelitian sebelumnya tentang kedalaman *slab* yang menujam wilayah Sumatera bagian utara. Untuk gempa yang diakibatkan oleh sesar dan gempa *low frequency* di bawah Toba baik sebelum dan setelah relokasi terlihat berada pada kedalaman kurang dari 50 km.

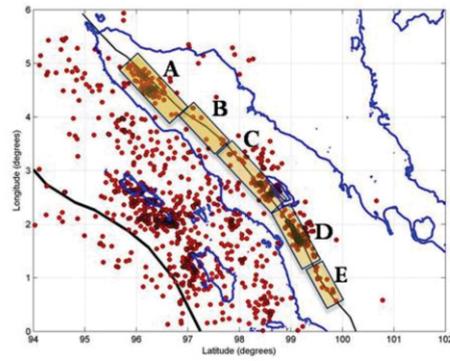
Perbedaan yang mencolok dari gambar 10 adalah bahwa sebelum relokasi banyak gempa dengan kedalaman *fixed depth*, sehingga dalam gambar terlihat seperti ada garis datar di kedalaman 10 km. Berbeda setelah proses relokasi, kedalaman *fixed*

*depth* banyak yang berubah, sehingga kedalaman gempa lebih bervariasi.

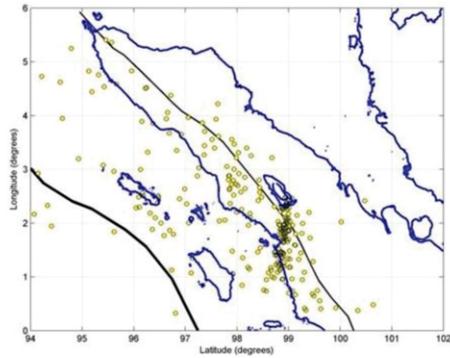
Ilustrasi kondisi tektonik yang sesuai dengan hasil relokasi ditunjukkan dengan gambar 11 dimana bulatan kecil merupakan sumber gempa, kerak oseanik (bidang berwarna biru muda) menujam kerak kontinen (bidang berwarna biru tua) dan *slab* litosfer digambarkan dengan bidang berwarna merah.



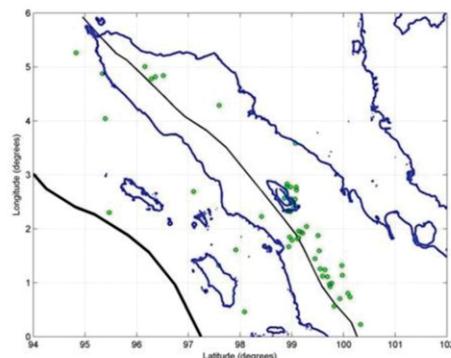
**Gambar 8.** a) Distribusi gempa sebelum relokasi; b) Distribusi gempa setelah relokasi; c) Overlay distribusi gempa sebelum relokasi (bulatan hijau) dan sesudah relokasi (bulatan merah).



(a)



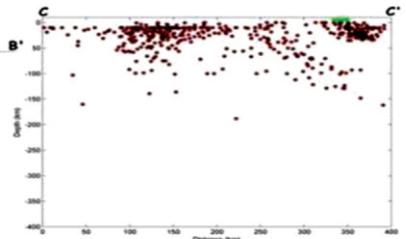
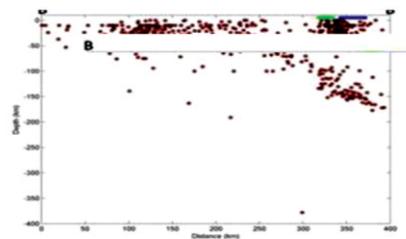
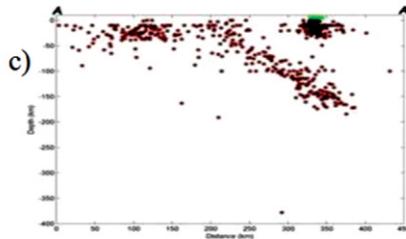
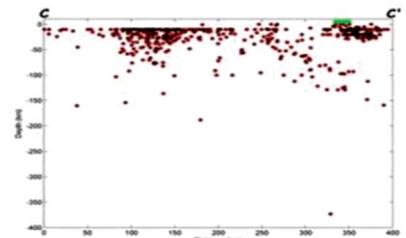
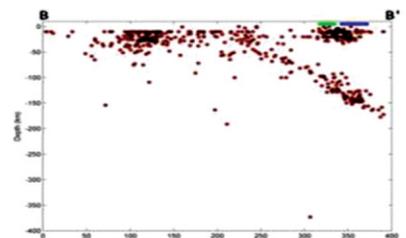
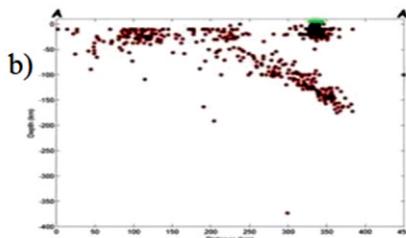
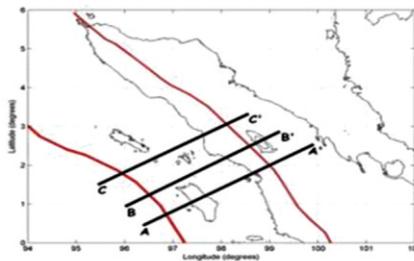
(b)



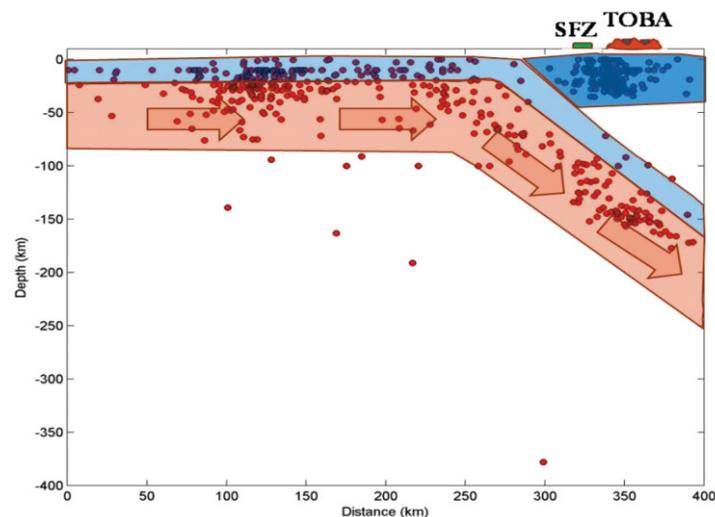
(c)

Gambar 9. Distribusi hasil proses relokasi berdasarkan kedalaman. (a) Bulatan merah adalah gempa dangkal ( $< 60\text{ km}$ ) dengan kotak A adalah kelurusan segmen Aceh, kotak B kelurusan segmen Tripa, kotak C kelurusan segmen Renun, kotak D kelurusan segmen Toru dan kotak E merupakan kelurusan segmen Barumun; (b) Bulatan kuning adalah gempa menengah ( $60-150\text{ km}$ ); (c) Bulatan hijau adalah gempa dalam ( $> 150\text{ km}$ ).

a)



Gambar 10. Irisan vertikal sebaran sumber gempa. Garis hitam (garis penampang irisan), bulatan merah (sumber gempa), garis hijau (proyeksi sesar) dan garis biru (proyeksi Toba). a). Plot garis penampang; b). Sebelum relokasi; c). Setelah relokasi.



Gambar 11. Ilustrasi kondisi tektonik di bawah Sumatera bagian utara

#### 4. Kesimpulan

Secara horisontal gempa setelah relokasi mengalami perubahan jarak, beberapa gempa terlihat signifikan dimana terjadi perubahan posisi antara 40-70 km. Secara vertikal terlihat perubahan yang cukup signifikan yaitu hampir setengah dari data penelitian mengalami perubahan kedalaman hingga 60 km. Perbedaan yang signifikan ini kemungkinan dapat disebabkan karena kesalahan *picking* sinyal gelombang P dan atau pemakaian model kecepatan gelombang yang kurang tepat. Dengan menggunakan kecepatan gelombang tiga dimensi terlihat hasil relokasi lebih baik dibandingkan hasil sebelumnya. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai rms hasil relokasi yang lebih kecil daripada nilai rms sebelum direlokasi.

Dari studi seismisitas hasil relokasi dapat kita simpulkan juga bahwa hampir semua segmen di wilayah Sumatera bagian utara berada dalam kondisi aktif. Hal ini terlihat dari pola kelurusan yang berimpitan dengan zona sesar Sumatera, dimana kedalaman gempanya tidak lebih dari 50 km.

**Ucapan Terima Kasih.** Penulis mengucapkan terima kasih kepada BMKG yang telah menyediakan data gempa di wilayah Sumatera bagian utara dan tidak lupa kami ucapkan terima kasih juga kepada IRIS atas penggunaan data PASSCAL di daerah Toba Sumatera Utara.

#### Daftar Pustaka

[1] E. R. Engdahl, R. D. Van der Hilst, dan R. P. Buland, "Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination," *Bull. Seim. Soc. Am.*, Vol. 88, pp. 722-743, 1998.

[2] A. D. Nugraha, dan J. Mori, "Three-dimensional velocity structure in the Bungo channel and

shikoku area, Japan, and its relationship to low-frequency earthquakes," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, hal. 1-5, 2006.

[3] H. Nugroho, S. Widiyantoro, dan G. Ibrahim, "Penentuan hiposenter gempabumi dengan menggunakan metode guided grid search dan model struktur kecepatan tiga dimensi," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol. 8, hal. 48-60, 2007.

[4] M. Ramdhan, dan A. D. Nugraha, "Studi kegempaan area Selat Sunda dan sekitarnya berdasarkan hasil relokasi hiposenter menggunakan metode double difference," *Jurnal JTM*, Vol. XIX No.4, hal. 184-189, 2012.

[5] A. P. Sakti, A. D. Nugraha, dan S. Rohadi, "Kajian seismisitas wilayah Selat Sunda dan Jawa bagian Barat menggunakan data hasil relokasi simultan terhadap struktur kecepatan tiga dimensi gelombang P," *Jurnal JTM* Vol. XIX, No.2, hal. 75-81, 2012.

[6] Pesicek J. D., Thurber C. H., Zhang H., DeShon H. R., Engdahl E. R., Widiyantoro S., "Teleseismic double-difference relocation of earthquakes along the Sumatra-Andaman subduction zone using a 3-D model," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, pp. 1-20, 2010.

[7] B. R. Wuladari, dan N. Hurukawa, "Relocation of large earthquakes along the Sumatran fault and their fault planes," *Bulletin of IISSE*, Vol. 47, pp. 24-30, 2013.

[8] J. R. Evans, D. Eberhart-Phillips, dan C. H. Thurber, *User's manual for simulps12 for imaging vp and vp/vs: a derivative of the "thurber" tomographic inversion simul3 for local earthquakes and explosions*, U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 94-431, 1994.

[9] C. H. Thurber, edited by H. M. Iyer and K. Hirahara, "Local earthquake tomography velocities and vp/vs theory." in *Seismic Tomography: Theory and Practice*. London:

- Chapman and Hall, 1993, pp. 563–583.
- [10]J. Um, dan C. Thurber, “A fast algorithm for two points seismic ray tracing,”*Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, pp. 972-986, 1987.
- [11]K. Sieh, and D. Natawidjaja, “Neotectonics of The Sumatran fault, Indonesia,”*Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, issue 28, pp. 295–326, 2000.
- [12]Masturyono, R. McCaffrey, D. A. Wark, S. W. Roecker, Fauzi, G. Ibrahim, dan Sukhyar, “Distribution of magma beneath Toba Caldera, North Sumatra, Indonesia, constrained by 3-dimensional P-wave velocities, seismicity, and gravity data,”*Geochemistry, Geophysics & Geosystems*, Vol. 2, pp. 1-15, 2001.