Analisis Model Kecepatan Seismik 1-D Dan Relokasi Hiposenter Gempa

Sumatera Utara 19 Mei - 31 Agustus 2008

Rani Meiliana¹, Reza Rizki¹, Erlangga Ibrahim Fattah¹

¹Institut Teknologi Sumatera

Email : ranimeiliana15@gmail.com

Abstact: The North Sumatra region is one of the active tectonic zones in Indonesia where the Semangko fault passes so that this area often occurs tectonic earthquakes. In connection with tectonic conditions in North Sumatra and the presence of local active faults that can trigger earthquakes, earthquake parameter information is needed. One way to increase the accuracy of parameter information from earthquakes is by relocating a hypocenter. The purpose of this research is to relocate the earthquake hypocenter and determine the 1-D seismic wave velocity model in North Sumatra using seismic recording data from 19 May to 31 August 2008. Picking the arrival time of P and S waves gets 100 earthquake events and determines the location. Initial hypocenter using the Geiger method as well as hypocenter Velocity method. Based on the results of research, the hypocenter distribution is a type of distant tectonic earthquake, namely the value of Ts-tp \geq 5 s and a depth of 20 - 140 km which indicates a medium earthquake with GAP \leq 180 and RMS of 0.8 s. The results of the P and S wave velocity model get 6 layers at a depth of 0 - 140 km below the surface with a Vp value between 5.797 km / s to 8.252 km / s and a Vs value between 3.454 km / s to 4.594 km / s.

Keywords: Hypocenter relocation, picking, 1-D seismic wave velocity model, Geiger method, Coupled Hypocenter Velocity method

Abstrak: Daerah Sumatera Utara merupakan salah satu zona tektonik aktif di Indonesia yang dilalui sesar Semangko sehingga daerah ini sering terjadi gempa tektonik. Sehubungan dengan kondisi tektonik di Sumatera Utara dan adanya patahan aktif lokal yang dapat memicu terjadinya gempa bumi sehingga dibutuhkan informasi parameter gempa bumi. Salah satu cara untuk meningkatkan akurasi informasi parameter dari gempa bumi dengan relokasi hiposenter. Tujuan penelitian ini adalah relokasi hiposenter gempa dan penentuan model kecepatan gelombang seismik 1-D di daerah Sumatera Utara menggunakan data rekaman seismik pada tanggal 19 Mei hingga 31 Agustus 2008. Dengan melakukan picking waktu tiba gelombang P dan S mendapatkan 100 event gempa dan dilakukan penentuan lokasi hiposenter awal menggunakan metode Geiger serta relokasi hiposenter dan penentuan model kecepatan gelombang seismik 1-D dengan metode Coupled Hypocenter Velocity. Berdasarkan hasil penelitian sebaran hiposenter merupakan jenis gempa tektonik jauh yaitu nilai Ts-tp ≥ 5 s dan kedalaman 20 – 140 km yang menunjukkan gempa bumi menengah dengan GAP ≤ 180° dan RMS sebesar 0.8 s. Hasil model kecepatan gelombang P dan S mendapatkan 6 lapisan pada kedalaman 0 - 140 km di bawah permukaan dengan nilai Vp antara 5,797 km/s hingga 8,252 km/s dan nilai Vs antara 3,454 km/s hingga 4,594 km/s.

Kata kunci: Relokasi hiposenter, *picking*, model kecepatan gelombang seismik 1-D, metode Geiger, metode *Coupled Hypocenter Velocity*

Pendahuluan

Pulau Sumatera dilalui oleh sesar Semangko yang merupakan patahan aktif Sumatera dan terpanjang di Indonesia. Sepanjang patahan ini daerah yang dilalui merupakan daerah lemah dan rawan gempa. Pelepasan energi pada segmen tertentu di jalur patahan tersebut mengakibatkan terjadinya gempa. Dengan sumber utama gempa yaitu busur Sunda dan sesar Sumatera. Sesar Sumatera merupakan dampak dari tumbukan *oblique* subduksi di busur Sunda bagian barat[1].

Salah satu daerah di pulau Sumatera yaitu daerah Sumatera Utara yang merupakan salah satu zona tektonik aktif di Indonesia karena memiliki sesar Semangko sehingga daerah ini sering terjadi gempa tektonik. Sumatera Utara berada pada zona subduksi antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia yang mana terjadi penunjaman Lempeng Eurasia dibawah IndoAustralia [2]. Pada daerah Sumatera Utara terdapat empat patahan aktif lokal yaitu, patahan aktif Toru, Angkola, Renun dan Barumun dimana tipe patahan ini yaitu strike slip (patahan mendatar). Secara regional Sumatera Utara dominan batuan gunung api vulkanik tuffa Toba (Qvt) yang berumur Pleistosen. Termasuk satuan Piroklastik Toba 2 (Qvt) berwarna abu-abu terang.. Umur satuan ini diperkirakan berumur Kuarter dan merupakan aliran piroklastik hasil aktifitas gunung api purba Toba. Sumatera Utara tersingkap berbagai macam batuan mulai dari batuan beku, sedimen hingga malihan yang berumur Karbon hingga umur Pleistosen. Batuan intrusif tua yang berumur Kapur hingga Tersier, baik jenis granodiorit maupun granit porfiri yang terdapat di daerah Padang Sidempuan sampai daerah selatan Solok, Sumatera Barat dan juga di bagian timur hingga barat daerah Sibolga. Batuan intrusif tua dan malihan berumur pra-Tersier menjadi basement dari cekungan-cekungan sedimen di sepanjang jalur belakang busur vulkanik.

Secara geologi Sumatera Utara terletak pada zona subduksi pertemuan lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Akibat pertemuan kedua lempeng tersebut menyebabkan timbulnya beberapa sesar aktif yang berpotensi menjadi titik pusat gempa bumi [3].

Gempa-gempa di daerah Sumatera Utara ini sering terjadi dengan berbagai sumber baik dari sesar Sumatera maupun gunung api aktif disekitarnya. Sehubungan dengan kondisi tektonik di Sumatera Utara dan adanya patahan aktif lokal yang dapat memicu terjadinya gempa bumi maka dibutuhkan parameter gempa informasi bumi. Di Sumatera Utara penelitian dalam menentukan ketepatan parameter gempa bumi masih sedikit dilakukan. Informasi ketepatan

parameter gempa bumi akan membantu upaya mitigasi gempa bumi melalui kajian lanjut identifikasi sesar atau patahan lokal yang menjadi penyebab terjadinya gempa bumi tektonik maupun aktivitas dari gunung api aktif disekitar penelitian. Salah satu cara untuk meningkatkan akurasi informasi parameter dari gempa bumi adalah dengan dilakukan relokasi hiposenter gempa bumi. Parameter gempa bumi meliputi : (1) Waktu kejadian gempa bumi (Origin Time); (2) Episenter; (3) Kedalaman sumber gempa bumi; dan (4) Kekuatan gempa bumi atau magnitudo.



Gambar 1. Daerah Penelitian

Penelitian dengan menggunakan metode Geiger dengan software Geiger's method with Adaptive Damping (GAD) yang merupakan metode penentuan hiposenter tunggal, yaitu dengan menghitung waktu residual, selisih antara waktu pengamatan (Tobs) dan waktu perhitungan $(T_{cal})[4].$ Selanjutnya menggunakan metode *Coupled* Velocity Hypocenter untuk mendapatkan lokasi hiposenter sebenarnya dan model kecepatan baru 1D dengan koreksi stasiun dengan menggunakan program VELEST[5].

Metode

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data rekamanan seismik 19 Mei – 31 Agustus 2008 dari GFZ-Postdam (GEOFON) pada situs <u>http://eida.gfzpotsdam.de/webdc3/</u> dengan 42 stasiun perekam. Sebaran lokasi penelitian dan stasiun perekam ditunjukkan pada **Gambar 2.**



Gambar 2. Download data rekaman seismik di GFZ -Postdam

Data rekamanan seismik kemudian ini dilakukan picking waktu tiba gelombang P dan gelombang S dengan software SeisGram2k70 pada Gambar 2. Selanjutnya, memplot waktu tiba gelombang P dan Gelombang S ke diagram Wadati untuk melihat hasil picking gelombang yang baik dengan nilai perbandingan $\frac{Vp}{Vs} - 1$ pada rentang nilai 0.6 -0.9



Gambar 3. Tampilan *picking* gelombang P dan S

Sebelum menentukan posisi pusat gempa bumi, parameter dasar yang ditentukan dulu adalah waktu terjadinya gempa bumi atau origin time. Penentuan waktu terjadinya gempa bumi menggunakan diagram Wadati. origin time (To) dinyatakan pada persamaan :

$$To = Tp - \frac{(Ts - Tp)}{(\frac{Vp}{Vs} - 1)}$$
(1)

Selanjutnya, hasil *picking* gempa digunakan dalam menjalankan *software* GAD untuk mendapatkan lokasi hiposenter awal. Terdapat 3 file *input* dalam GAD yaitu *station*.dat merupakan koordinat tiap stasiun yang digunakan, *velocity*.dat merupakan model kecepatan *Vp* dan *Vs* dan *arrival*.dat yang merupakan hasil *picking* waktu tiba gelombang P dan gelombang S. Metode Geiger menggunakan software GAD (Geiger's method with Adaptive Damping) yang merupakan salah satu software yang umum digunakan untuk penentuan posisi hiposenter terutama dalam penentuan lokasi hiposenter gempa di daerah gunungapi atau pada daerah yang mempunyai jarak relatif dekat antara penerima (receiver) dan sumber gempa [6]. Metode Geiger adalah sebuah proses iterasi menggunakan optimasi Gauss-Newton untuk menentukan lokasi gempa bumi atau peristiwa seismik. Awalnya metode ini dikembangkan untuk mendapatkan origin time untuk penentuan hiposenter, yaitu waktu mulai dari terjadinya gempa. Lokasi gempa didefinisikan dengan lokasi hiposenter gempa (x_0, y_0, z_0) dan origin time T_0 . Dimulai dari t adalah waktu tiba pertama (first arrival time) gelombang seismik di setiap stasiun pengamatan (seismometer) ke-i (xi, yi, zi) dari hiposenter (x₀, y₀, z₀), adalah waktu tempuh kalkulasi berdasarkan model kecepatan 1D bawah permukaan dan to adalah waktu asal (origin time). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$r = t_{obs} - t_{cal} \tag{2}$$

Dari Persamaan (2) apabila diketahui waktu tiba gelombang pada stasiun pengamat sama dengan jumlah dari waktu tempuh dan waktu asal, maka akan menghasilkan residual (*error*) yang bernilai nol, dapat diperkirakan bahwa posisi dan waktu asal gempa tersebut benar (tepat).

perhitungan Metode Geiger (Geiger, 1910 dalam Havskov dan Ottemoller, 2010) :

ri =
$$\frac{\partial T}{\partial xi} \Delta x + \frac{\partial T}{\partial yi} \Delta y + \frac{\partial T}{\partial zi} \Delta z + \Delta t 0$$
 (3)

Dimana Δx , Δy , Δz , Δt merupakan perubahan lokasi hiposenter dan waktu tiba, atau dapat dibuat dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1 cal}{\partial x_1} & \frac{\partial t_1 cal}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1 cal}{\partial z_1} & \frac{\partial t_1 cal}{\partial t_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial t_n cal}{\partial x_n} & \frac{\partial t_n cal}{\partial y_n} & \frac{\partial t_n cal}{\partial z_n} & \frac{\partial t_n cal}{\partial t_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial x \\ \partial y \\ \partial z \\ \partial t \end{bmatrix}$$
(4)

Keterangan :

- $\partial x, \partial y, \partial z, \partial t$ = turunan parsial dari waktu tempuh perhitungan terhadap lokasi hiposenter awal
 - r1 = selisih antara hasil
 pengamatan dan hasil
 perhitungan pada stasiun ke-i
 - *n* = jumlah stasiun

Menurut Madrinovella (2012), metode Geiger menghasilkan hiposenter yang sesuai dengan data geologi yang dekat dengan sumber gempa yaitu sesar atau gunung api. Dalam metode Geiger tidak adanya koreksi stasiun, posisi hiposenter dan velocity sehingga metode ini belum akurat dalam posisi hiposenter yang sebenarnya. Hal ini karena metode ini digunakan untuk memberikan informasi tercepat kepada masyarakat mengenai hiposenter gempa bumi. Sehingga dilakukan relokasi hiposenter dan pembaharuan model kecepatan gelombang 1-D untuk mendapatkan model kecepatan di daerah penelitian menggunakan metode Coupled Velocity Hypocenter dengan software VELEST. Relokasi dengan metode Coupled Hypocenter mendapatkan Velocity hasil perbaikan posisi hiposenter gempa (longitude, latidute, depth) dengan koreksi stasiun.

Metode Coupled Velocity Hypocenter merupakan salah satu metode penentuan model kecepatan gelombang seismik 1D yang digunakan pada penelitian ini, dikembangkan oleh Kisling et.al (1995) dalam program VELEST 3.3. Metode Coupled Velocity Hypocenter adalah metode dalam melakukan relokasi hiposenter, model kecepatan dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger yang telah dimodifikasi dan pembaharuan model kecepatan menggunakan persamaan Kissling [4]. Data yang digunakan pada metode ini yaitu data gempa bumi, model awal kecepatan daerah penelitian dan lokasi stasiun.

Model kecepatan baru menggunakan persamaan Kissling (1995), didapatkan model kecepatan yang telah diperbaharui menggunakan persamaan:

$$= t_{obs} - t_{cal} = \sum_{k=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e$$
(5)

Keterangan:

- r = residual waktu tempuh observasi dan
 waktu tempuh kalkulasi (s)
- t_{obs} = waktu tempuh observasi (s)
- t_{cal} = waktu tempuh kalkulasi (s)
- f = fungsi terhadap lokasi stasiun (s)
- h_k = lokasi hiposenter (*long, lat*), kedalaman (km) dan waktu tiba atau *origin time* (s)
- m = model kecepatan (km/s).
- e = koreksi stasiun atau error dari waktu
 tiba perngamatan maupun
 perhitungan (s)
- k = jumlah hiposenter.
- i = jumlah stasiun

Nilai eror (e) dari proses pengamatan dan perhitungan dapat dihitung dengan menggunakan *least squares* :

$$e = \sum_{i=1}^{n} (ri)^2 \tag{6}$$

Untuk menentukan RMS residual dengan mengakarkan eror (*e*) dari waktu tiba terhadap banyak data (n) :

$$RMS = \sqrt{\frac{e}{n}}$$
(7)

Persamaan dalam mendapatkan waktu tempuh hasil perhitungan (t_{cal}) pada lokasi hiposenter yaitu:

$$t_{cal} = \sqrt{\frac{(x-xi)^2 + (y-yi)^2 + (z-zi)^2}{v}}$$
(8)

Nilai-nilai tersebut digunakan dalam forward modeling untuk memperoleh nilai t_{cal} baru yang akan dibandingkan misfitnya dengan t_{cal} sebelumnya. Tahapan tersebut merupakan tahapan dalam VELEST untuk satu iterasi.

Dalam setiap iterasinya, tercantum nilai RMS antara data waktu tempuh observasi dan waktu tempuh perhitungan, sehingga jumlah iterasi dapat diatur hingga memenuhi kriteria RMS yang diharapkan. Pada tahap *inverse modeling* dilakukan dengan menyelesaikan Matriks Damped Least Square :

$$\Delta m = [G^T G + L]^{-1} G^T \Delta d \tag{9}$$

Keterangan :

G = Matriks Jacobi,

 G^T = Transpose Matriks Jacobi,

L = Matriks damping,

 Δd = Data observasi dikurangi data kalkulasi ($t_{\rm obs} - t_{\rm cal}$),

 $\Delta m =$ Parameter model observasi dikurangi kalkulasi.

Penggunaan nilai damping akan mempengaruhi nilai perturbasi parameter model (Δm) , dengan hubungan antara besarnya damping dan nilai ∆m adalah berkebalikan. Hasil dari inverse modeling adalah vektor perbaikan parameter model (Δm) yang selanjutnya diperoleh nilai parameter hiposenter, model kecepatan gelombang seismik 1D, dan koreksi stasiun.

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data gempa bumi, model awal kecepatan daerah penelitian dan lokasi stasiun. Adapun data *input* yang diperlukan pada pengolahan data VELEST [5] :

*.cnv adalah data gempa bumi (travel time, oringin time)

- *.mod adalah perkiraan model kecepatan
- *.sta adalah list stasiun beserta posisinya.
- *.cmn adalah kontrol parameter.

Mendapatkan *.OUT yang merupakan *file* hasil berupa : hiposenter, *travel time*, koreksi stasiun, serta model kecepatan 1D baru.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini yang digunakan sebagai model awal kecepatan gelombang P (Vp) dan gelombang S (Vs) adalah model kecepatan AK135.

Tabel 1. Model kecepatan 1D gelombang seismikAK135(Bormann, 2002).

Depth		Vs
(km)	Vp (km/s)	(km/s)
0	5.8	3.46
20	5.8	3.46
20	6.5	3.85
35	6.5	3.85
36	8.04	4.48
77.5	8.045	4.49
120	8.050	4.5

Hasil

Picking Gelombang P, Gelombang S dan Diagram Wadati

Pada penelitian ini menggunakan data rekaman seismik dengan 42 stasiun perekam di Sumatera Utara pada 19 Mei 2008 hingga 31 Agustus 2008 pada koordinat 1° - 4° LU dan 98° - 100° BT, Luas daratan Provinsi Sumatera Utara 71.680 km². Data rekaman seismik diolah dengan picking waktu tiba gelombang P dan gelombang S dengan Ts – Tp bernilai ≥ 5 detik yang merupakan gempa tektonik jauh. Dalam picking data rekaman seismik diperlukan hasil yang baik untuk tahap penelitian selanjutnya, sehingga perlu ketelitian saat picking data seismik. Diagram Wadati merupakan parameter dari kualitas picking yang telah baik, dengan memplot selisih waktu tiba gelombang S dan P (Ts-Tp) pada sumbu Y dan waktu tiba gelombang P pada sumbu X. Selisih waktu tiba gelombang P dan S akan terus bertambah sebanding dengan bertambahnya waktu tiba gelombang P yang terekam. Hal ini dapat dilihat dari nilai gradien garis (Vp/Vs-1) diagram Wadati yang berada dalam rentang 0.6-0.9 yang dikategorikan hasil picking baik salah satu contoh diagram Wadati event pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Wadati event gempa 19 Mei 14h49m

Hasil *picking* data rekaman seismik pada tanggal 19 Mei hingga 31 Agustus 2008 mendapatkan waktu tiba gelombang P dan gelombang S 1.396 data waktu tiba dan *event* gempa sebanyak 100 *event*. Kemudian hasil *picking* gelombang P dan gelombang S dapat menentukan waktu kejadian gempa (*origin time*) pada titik hiposenter. Dengan data waktu kejadian gempa kemudian dilakukan *plotting* selisih waktu tiba gelombang P dan *origin time* (Tp-T0) terhadap selisih waktu tiba gelombang S dan gelombang P (Ts-Tp) pada semua *event* gempa untuk meilihat gradien seluruh kejadian dari 100 *event* gempa. Mendapatkan nilai gradien seluruh *event* gempa yaitu 0.6887 pada **Gambar 6.** yang menunjukkan kelurusan gradien dan memenuhi syarat nilai gradien yang baik yaitu antara rentang 0.6 - 0.9.



Agustus 2008

Distribusi Persebaran Hiposenter Gempa

Pada penelitian ini dilakukan penetuan posisi hiposenter gempa menggunakan metode Geiger dengan software Geiger's with Adaptive Damping (GAD). Data input berupa hasil picking pada pengolahan sebelumnya yaitu data travel time dan informasi stasiun perekam gempa. Model velocity yang digunakan pada penelitian yaitu AK135 yang merupakan model velocity global. Distribusi persebaran hiposenter sebelum dilakukan relokasi mendapatkan posisi awal terjadinya gempa bumi pada Gambar 6. dengan kedalaman koordinat hiposenter < 140 km. Persebaran posisi hiposenter secara horizontal menyebar pada Selatan hingga Barat daerah penelitian.



Gambar 7. Persebaran hiposenter awal gempa Sumatera Utara sebelum relokasi



Gambar 8. Cross Section penampang A-B Gempa Sumatera Utara Sebelum Relokasi

Dilakukan relokasi hiposenter dan pembaharuan model kecepatan gelombang 1-D untuk mendapatkan model kecepatan di daerah penelitian menggunakan metode Coupled Velocity Hypocenter dengan software VELEST. Relokasi dengan metode Coupled Velocity Hypocenter mendapatkan hasil perbaikan posisi hiposenter gempa (longitude, latidute, depth) dengan koreksi stasiun pada Gambar 8.



Sumatera Utara



Gambar 10. Cross Section Penampang A-B Gempa Sumatera Utara Setelah Relokasi

Jika dibandingkan hasil data sebelum relokasi dan sesudah relokasi, maka akan terlihat pergeseran persebaran hiposenter pada **Gambar 10.** Hasil relokasi menunjukkan perubahan posisi *latitude, longitude* serta kedalaman pada masing-masing *eventt* gempa yang tidak signifikan.



Gambar 11. Distribusi Hiposenter gempa bumi Sumatera Utara sebelum dan sesudah relokasi



Gambar 12. Cross Section Penampang A-B Gempa Sumatera Utara Sebelum dan Sesudah Relokasi

Dari hasil persebaran sebelum dan sesudah relokasi terjadi perubahan posisi horizontal dan vertikal pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** yang tidak jauh dengan posisi awal. Hasil sebaran hiposenter secara vertikal berada pada kedalaman 0 – 140 km, hal ini menunjukkan bahwa gempa bumi daerah penelitian termasuk gempa menengah. Gempa bumi menengah pada umumnya menimbulkan kerusakan ringan dan getarannya lebih terasa. Persebaran hiposenter yang tidak merata ini

dapat disebabkan dari picking gempa dengan nilai waktu tiba gelombang Ts-Tp ≥ 5 detik.

Setelah hasil relokasi hiposenter, pada penelitian ini didapatkan nilai azimuth GAP setiap *event*. Azimuth GAP merupakan selisih sudut antara 2 event gempa terdekat dengan stasiun referensi [7].

Pada penelitian ini diperoleh azimuth GAP setiap event antara 51° - 280°, dengan ratarata GAP sebesar 178°. Hasil rata-rata azimuth GAP ini telah memenuhi syarat batas yang baik. Nilai azimut GAP pada model velocity lokal gelombang seismik 1D yang baik memiliki nilai 122° hingga 180° [5].

Dari hasil *azimuth* GAP setiap *event* beberapa terdeteksi cukup besar, hal ini karena jarak antara koordinat dua *event* yang jauh. Dilakukan *sorting* dan di *plotting* untuk *event* dengan nilai *azimuth* GAP kurang dari 220° didapatkan hasil pada **Gambar 12** dan **Gambar 13.**



Gambar 13. Distribusi relokasi hiposenter gempa bumi Sumatera Utara dengan *azimuth* GAP < 220°



Sumatera Utara dengan Azimuth GAP < 220°

Model Kecepatan Seismik 1-D

Pada penelitian ini selain mendapatkan hasil gempa bumi, metode Coupled relokasi Velocity Hypocenter menghasilkan model kecepatan baru. Model kecepatan gelombang seismik sangat berpengaruh dalam hasil relokasi hiposenter. Parameter kontrol pada VELEST juga berpengaruh dalam hasil yang didapatkan untuk relokasi hiposenter. Sehingga parameter yang diperlukan harus sesuai agar hasil relokasi hiposenter gempa bumi lebih akurat. Model kecepatan yang dihasilkan akan menggambarkan kondisi tektonik dan geologi bawah permukaan. Model kecepatan gelombang seismik P dan S 1D lokal didapatkan dari hasil inputan model kecepatan awal AK135 yang berskala global.

Pada hasil penelitian ini didapatkan 6 lapisan data Vp dan Vs pada kedalaman 0 - 140 km di bawah permukaan. Hasil pemodelan kecepatan gelombang P dan gelombang S setelah relokasi mengalami penurunan dari model kecepatan inisial. Hasil inversi pada penelitian ini diperoleh nilai kecepatan gelombang P lokal Sumatera Utara antara 5,797 km/s hingga 8,252 km/s dan nilai kecepatan gelombang S lokal 3,454 km/s hingga 4,594 km/s.

Pada kedalaman 0 – 20 km lapisan ini teridentifikasi sebagai lapisan kerak bumi bagian atas (upper crust). Pada lapisan ini mengalami penurunan kecepatan dari model awal yang diberikan diindikasi karena geologi pada daerah penelitian yang dominan vulkanik Tuffa Toba sehingga, pada kedalaman ini model kecepatan gelombang P dan S mengalami penurunan karena struktur batuan pada daerah penelitian yang termasuk satuan Piroklastik Toba (Qvt) yang mengandung fragmen batuapung sehingga menyebabkan densitas pada batuan tersebut kecil. Keadaan tersebut memudahkan gelombang P untuk menjalar kepermukaan bumi sehingga waktu yang dibutuhkan untuk sampai ke stasiun perekam mengalami perlambatan.

Nilai kecepatan gelombang P meningkat pada lapisan 20 – 35 km menjadi 6, 026 km/s hingga 6,496 km/s dari nilai kecepatan lapisan sebelumnya, lapisan ini diindikasi sebagai lapisan kerak bumi bagian bawah. Pada kedalaman 35 – 78 km, nilai kecepatan gelombang P meningkat dari nilai kecepatan pada lapisan sebelumnya menjadi 8,02 km/s yang terindikasi sebagai lapisan mantel bagian atas.

Selain itu, hasil sebaran relokasi hiposenter secara vertikal menunjukkan kedalaman sampai 140 km. Dimana sebaran hiposenter ini diindikasi mencapai zona subduksi dan adanya *partial melting* saat kedalaman mencapai 100 km[8]. Hal ini dapat dilihat dari hasil model kecepatan Vp dan Vs yang mengalami penurunan dibandingkan model awal.



Gambar 15. Grafik Hasil Model Kecepatan 1-D Gelombang P



Gambar 16. Grafik Hasil Model Kecepatan 1D Gelombang S

Pada penelitian Tugas Akhir ini, didapatkan juga hasil RMS yang menunjukkan tingkat ketelitian data gempa yang digunakan. RMS (*Root Mean Suare*) merupakan selisih T_{cal} dan T_{obs} . Menurut Kissling (1995), RMS yang didapatkan pada penelitian harus memiliki nilai serendah < 1 untuk mendapatkan hasil yang baik. Pengolahan data yang dilakukan menggunakan metode inversi secara simultan dengan iterasi sebanyak 9 kali pengulangan hingga nilai RMS residual konvergen RMS Residual dengan iterasi dilakukan sebanyak 9 kali dan nilai RMS sebesar 0,8 detik.



Gambar 17. Grafik RMS Residual per iterasi



Gambar 18. Histogram RMS sebelum dan sesudah relokasi

Software VELEST tidak hanya memperoleh hasil berupa model kecepatan 1-D gelombang P dan S, relokasi hiposenter baru, RMS dan GAP tetapi software ini juga menghasilkan hasil berupa koreksi. Dalam penelitian ini digunakan 42 stasiun perekam yang tersebar di Sumatera Utara. Koreksi stasiun merupakan perbaikan waktu yang dibutuhkan gelombang P untuk sampai pada stasiun perekam. Hasil korekasi stasiun pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Menunjukkan hasil dari stasiun perekam yang digunakan dalam penelitian ini memiliki 28 stasiun yang bernilai positif (+), dengan nilai 2 koreksi yang sama yaitu + 0,0015 sebanyak 9 stasiun dan + 0,0019 sebanyak 19 stasiun. Stasiun dengan nilai koreksi positif ini disebabkan karena kecepatan penjalaran gelombang P yang direkam oleh stasiun lebih lambat dari kecepatan yang diperkirakan oleh model, sehingga waktu tempuh yang digunakan gelombang P untuk sampai ke stasiun perekam lebih lama. Hal ini menggambarkan lapisan batuan yang berada dibah perekam sedimen yang bersifat memperlambat kecepatan rambat gelombang. Sehingga gelombang P sulit menjalar dan membutuhkan waktu yang lama untuk sampai ke stasiun perekam. Nilai koreksi yang sama antar stasiun ini menggambarkan bawah permukaan yang sama antar stasiun sehingga memiliki nilai koreksi stasiun yang sama. Koreksi stasiun 0 s terdapat pada 12 stasiun perekam yang menunjukkan bahwa kecepatan gelombang P untuk sampai ke stasiun perekam adalah sama dengan kecepatan yang diperkirakan oleh model, sehingga memiliki waktu yang sama.

stasiun	koreksi stasiun	stasiun	koreksi stasiun
LT01	0	LT43	0
LT02	0	LT09	0
LT04	0.0015	LT17	0
LT05	0	LT18	0.0019
LT06	0	LT31	0.0019
LT11	0	LT32	0.0019
LT13	0.0019	LT33	0.0019
LT21	0.0015	LT34	0.0019
LT23	0	LT35	0.0019
LT25	0.0015	LT36	0.0019
LT27	0	LT37	0.0019
LT28	0.0015	LT39	0.0019
LT03	0.0015	LT40	0.0019
LT10	0.0019	LT41	0.0019
LT12	0.0019	LT42	0.0015
LT14	0.0015	LT44	0.0019
LT16	0.0015	LT45	0.0019
LT19	0	LT47	0.0019
LT20	0	LT49	0.0019
LT24	0.0015	LT50	0.0019

Tabel 2. Koreksi Stasiun

Kesimpulan

- Lokasi awal hiposenter dengan metode Geiger mendapatkan persebaran hiposenter yang menyebar pada Selatan hingga Barat daerah penelitian dengan jenis gempa tektonik jauh yaitu nilai Ts-Tp ≥ 5 detik, dan menghasilkan kedalaman 20 – 140 km yang menunjukkan gempa bumi menengah.
- 2. Relokasi hiposenter gempa mendapatkan nilai RMS rata-rata setelah relokasi 0,8 sec dan nilai rata-rata GAP sebesar 178°. Hasil model kecepatan 1-D gelombang P dan S menunjukkan perbedaan setelah relokasi pada kedalaman 0 sampai 140 km dengan nilai velocity mengalami penurunan dari model kecepatan awal karena kondisi geologi daerah penelitian, nilai kecepatan gelombang P lokal Sumatera Utara antara 5,797 km/s hingga 8,252 km/s dan nilai kecepatan gelombang S lokal 3,454 km/s hingga 4,594 km/s. Dan nilai koreksi stasiun menunjukkan positif kecepatan gelombang P untuk sampai ke stasiun seismik memiliki kecepatan yang lebih lambat dari kecepatan rata-rata yang menggambarkan lapisan batuan yang berada dibawah perekam sedimen yang bersifat memperlambat kecepatan rambat gelombang. Sehingga gelombang P sulit menjalar dan membutuhkan waktu yang lama untuk sampai ke stasiun perekam.

Saran

- Dalam pengolahan *picking* gempa di perlukan ketelitian, dan disesuaikan dengan diagram Wadati untuk melihat hasil *picking* yang telah sesuai.
- Memasukkan nilai velocity pada GAD harus tepat pada saat pengolahan GAD, karena akan menghasilkan nilai error dan tidak terbaca jika tidak sesuai dan berpengaruh pada hasil persebaran hiposenter.

Daftar Pustaka

- K. Sieh and D. Natawidjaja, "Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia," J. Geophys. Res. Solid Earth, vol. 105, no. B12, pp. 28295– 28326, 2000, doi: 10.1029/2000jb900120.
- [2] L. Eka R., "Estimasi Moment Tensor dan Pola Bidang Sesar," Jurnalsains Dan Seni Pomitssains Dan Seni Pomits, vol. 3, no. 2, pp. 1–5, 2014.
- [3] G. Wahyu, "Model Inversi 1d Struktur Lapisan Kerak Bumi Dengan Metode Algoritma Genetik Di Provinsi Sumatera Utara Indonesia," SAINS POMITS, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [4] S. A. Garini, Madlazim, and E. Rahmawati, "Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Sulawesi Tengah Dengan Menggunakan Metode Geiger Dan Coupled Velocity-Hypocenter," *Fisika*, vol. 03, pp. 107–112, 2014.
- [5] E. Kissling, S. S. Service, W. L. Ellsworth, and C. Thurber, "Velest user's guide -," vol. 1, no. October, 1995.
- [6] K. Nishi, "A three-dimensional robust seismic ray tracer for volcanic regions," *Earth, Planets Sp.*, vol. 53, no. 2, pp. 101–109, 2001, doi: 10.1186/BF03352367.
- [7] Isnaini and Madlazim, "Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Dengan Magnitudo ≥ 5, 0 Di Wilayah Sumatera Utara Periode Tahun 2012-2016," J. Inov. Fis. Indones., vol. 06, pp. 23–27, 2017.
- [8] I. Koulakov *et al.*, "The feeder system of the Toba supervolcano from the slab to the shallow reservoir," *Nat. Commun.*, 2016, doi: 10.1038/ncomms12228.