

Relokasi Hiposenter Gempa Bumi di Sumatera Selatan dengan Menggunakan Hypo71

Yungi Yudiar Rahman, Bagus Jaya Santosa
Jurusan Fisika, Fakultas IPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: bjs@physics.its.ac.id

Abstrak—Relokasi Hiposenter gempa bumi di Sumatera Selatan dilakukan dengan menggunakan software Hypo71. Relokasi Hiposenter merupakan permasalahan inversi nonlinear. Hypo71 menyelesaikan permasalahan ini dengan menggunakan metode *least square* yang menandakan terjadinya linearisasi terhadap persamaan nonlinear tersebut. Hypo71 dijalankan dengan memasukkan data kedalam file *input* (.inp) dan didapatkan hasil berupa file *output* (.prt). Data yang diinputkan adalah data stasiun, waktu tiba gelombang P dan S, dan model bumi. Kedua data pertama yaitu data stasiun dan waktu tiba gelombang P dan S didapat dari pengolahan dengan Winquake dan data model bumi menggunakan model bumi untuk Pulau Sumatera yang merupakan kombinasi antara Haslinger dan Santosa. Hypo71 memerlukan solusi awal yang selanjutnya akan diiterasi unruk mendapatkan solusi yang tepat yang ditandai dengan kekonvergenan. Berdasarkan relokasi yang telah dilakukan, didapatkan posisi hiposenter hasil relokasi yang bergeser dari posisi awal sebelum direlokasi. Selain itu didapatkan nilai rms yang beraneka ragam, dimana nilai ini sangat bergantung pada pemilihan solusi awal dan penentuan waktu tiba gelombang S dan P pada pengolahan data sebelumnya.

Kata Kunci—Relokasi hiposenter, inversi nonlinear.

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempabumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik[14]. Dalam peristiwa gempa bumi, batuan menunjukkan sifatnya sebagai padatan elastik. Padatan elastik ini dapat menjalankan berbagai fase gelombang sehingga dapat mengakibatkan adanya pergerakan permukaan tanah setelah gempa terjadi. Gelombang elastik dasar yang dijalankan ada dua yaitu gelombang P dan gelombang S. Selain itu terdapat gelombang kombinasi yang menjalar di permukaan bumi yaitu gelombang Rayleigh dan Love[4]. Seiring dengan bertambahnya tingkat peradaban ilmu, muncul kajian-kajian khusus tentang gempa bumi, dampak yang timbul akibat gempa bumi, deskripsi gempa bumi secara teoritis melalui pemodelan maupun pemanfaatan informasi yang diindikasikan oleh gempa bumi hingga kajian tentang parameter-parameter yang dapat disimpulkan dari penalaran gelombang-gelombang tersebut[1]. Parameter tersebut adalah origin time, hiposenter dan magnitudo[12]. Gempa bumi dapat terjadi di antara permukaan bumi sampai 700 km di bawah permukaan. Gempa bumi pada rentang kedalaman 0 – 700 km dibagi menjadi 3 daerah yaitu dangkal, menengah dan dalam. Gempa bumi dangkal adalah gempa pada kedalaman 0 – 70 km. Gempa bumi menengah pada kedalaman 70 – 300 km dan gempa bumi dalam pada kedalaman 300 – 700 km[15].

Sumatera terletak pada perbatasan antara lempeng Indian (Indo-Australia) di bagian selatan dan timur dan lempeng Eurasia dari timur sampai barat. Ketika dua lempeng bertemu, lempeng India ditekan ke dalam oleh tetangganya, membentuk Sunda Trench. Proses geologi yang terjadi sangat kompleks, sebagian besar pulau Sumatera dibentuk oleh runtuhnya batuan di bawah tekanan yang sangat besar. Batuan ini lalu berkembang menjadi lapisan kulit baru dan menimbulkan letusan gunung berapi. Kejadian gempa yang terjadi didekat batas pertemuan antara lempeng samudra yang menujam masuk ke bawah lempeng benua diklasifikasikan sebagai zona subduksi. Zona subduksi Sumatra terbentang dari selat Sunda ke arah utara hingga laut Andaman. Kegempaan pada zona subduksi Sumatra terjadi di dekat palung pertemuan lempeng hingga kedalaman sekitar 250 km dengan sudut penunjaman sekitar 30⁰ sampai 40⁰. Menurut LIPI, dorongan lempeng Indo-Australia terhadap bagian utara Sumatra adalah 55 mm/tahun dan 60 mm/tahun pada bagian selatan Sumatra. Patahan geser Sumatera merupakan indikasi saling berpapasan atau saling bergeser antara dua lempeng kerak bumi. Patahan ini merentang mulai dari banda Aceh sampai ke teluk Semangko di selat Sunda, dengan panjang sekitar 1650-1700 km[9].

Menke (1984) mendefinisikan teori inversi sebagai suatu kesatuan teknik atau metode matematika dan statistika untuk memperoleh informasi yang berguna mengenai sistem fisika berdasarkan observasi terhadap sistem tersebut. Sistem fisika yang dimaksud adalah fenomena yang kita tinjau, hasil observasi terhadap sistem adalah data sedangkan informasi yang ingin diperoleh dari data adalah parameter model. Jika data (d) dan parameter model (m) masing-masing dinyatakan oleh vektor berikut,

$$d = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_N]^T \quad (1)$$

$$m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_N]^T \quad (2)$$

Untuk kasus dimana fungsi yang menghubungkan data dengan parameter model adalah linear maka persamaan dapat dinyatakan oleh,

$$d = Gm \quad (3)$$

Dimana G adalah matriks Kernel (NxM) yang tidak mengandung elemen parameter model. Kita dapat menjalankan prosedur yang sederhana untuk memperoleh nilai parameter model dari data observasi. Dalam kenyataannya, tidak semua data observasi berhimpit dengan satu garis lurus. Jika kita mencoba melakukan *fitting* terhadap semua titik data observasi kepada satu garis, maka garis yang didapat disebut garis regresi. Misalnya, ada satu set data observasi yang ditulis sebagai $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, garis regresi dinyatakan sebagai,

$$y = a_0 + a_1 x \quad (4)$$

Dan setiap data memenuhi,

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + e_i \tag{5}$$

Dimana e_i disebut residual, atau sering juga disebut misfit atau kesalahan prediksi. Garis regresi tidak akan berhimpit dengan setiap data observasi dan biasanya untuk kasus inversi seperti ini selalu *overdetermined*. Secara umum, tipe masalah inversi seperti ini diselesaikan dengan metode *least squares*. Dengan metode *least square*, kita mencoba meminimalkan error e dengan cara menentukan nilai a_0 dan a_1 sedemikian rupa sehingga diperoleh jumlah kuadrat error yang minimal.

Diketahui data eksperimen yang telah di-plot dapat di dekati dengan sebuah persamaan garis, yaitu $a_0 + a_1 x_i$. Artinya, kita melakukan pendekatan secara linear, dimana fungsi pendekatan-nya adalah,

$$P(x_i) = a_0 + a_1 x_i \tag{6}$$

Problemnya adalah berapakah nilai konstanta a_1 dan a_0 yang sedemikian rupa, sehingga posisi garis tersebut paling mendekati atau bahkan melalui titik-titik data yang telah di-plot di atas? Dengan kata lain, sebisa mungkin y_i sama dengan $P(x_i)$ atau dapat diformulasikan sebagai,

$$\sum_{i=1}^m y_i - P(x_i) = 0 \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^m y_i - (a_0 + a_1 x_i) = 0 \tag{8}$$

Suku yang berada disebelah kiri dinamakan fungsi error, yaitu

$$E(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^m y_i - (a_0 + a_1 x_i) \tag{9}$$

Semua data yang diperoleh melalui eksperimen, fungsi error-nya tidak pernah bernilai nol. Jadi, tidak pernah didapatkan garis yang berhimpit dengan semua titik data eksperimen. Namun demikian, kita masih bisa berharap agar fungsi error menghasilkan suatu nilai, dimana nilai tersebut adalah nilai yang paling minimum atau paling mendekati nol. Harapan tersebut diwujudkan oleh metode *least square* dengan sedikit modifikasi pada fungsi error-nya sehingga

$$E(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^m [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \tag{10}$$

Agar fungsi error bisa mencapai nilai minimum, akhirnya didapatkan solusi,

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^m x_i^2 \sum_{i=1}^m y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i x_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i} \tag{11}$$

$$a_1 = \frac{m \sum_{i=1}^m y_i x_i - \sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i} \tag{12}$$

Metode *least squares* dapat didekati dengan operasi matriks. Kita tahu bahwa suatu problem geofisika selalu diupayakan agar dapat disederhanakan menjadi $d = Gm$. Kita ingin mendapatkan nilai m . Dan $d = Gm$ dapat dinyatakan dalam bentuk operasi matriks. Jika data yang kita miliki sangat ideal dalam arti tidak ada error sama sekali, maka m bisa diperoleh sebagai berikut

$$m = G^{-1} d \tag{13}$$

Akan tetapi, pada kenyataannya semua data pengukuran pasti memiliki error yang besarnya relatif. Karenanya, data observasi tak akan pernah fit secara sempurna dengan model,

$$d = Gm + e_i \tag{14}$$

dan selanjutnya satu-satunya cara untuk memperoleh solusi yang unik adalah dengan meminimalkan jumlah kuadrat dari residual, e_i . Cara ini akan meminimalkan perbedaan antara data lapangan dan model yang diprediksi melalui pemodelan *forward*. Dalam formulasi matematika dinyatakan dengan

$$q = e^T e = (d - Gm)^T (d - Gm) \tag{15}$$

agar minimal maka q diturunkan terhadap m , akhirnya diperoleh,

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \tag{16}$$

Untuk menyelesaikan persamaan 16 dengan operasi matriks secara numerik atau komputasi bisa menggunakan beberapa metode, diantaranya metode Eliminasi Gauss, *LU-Decomposition*, Iterasi Gauss-Seidel, dan *Singular Value Decomposition*. [6]

Untuk menjelaskan bagaimana penyelesaian model inversi untuk letak hiposenter gempa bumi, maka lokasi gempa dianggap sebagai lokasi dengan material yang homogen, sehingga kecepatan gelombang yang melaluinya adalah sama. Medium homogen akan lebih menyederhanakan model yang akan dibuat. Koordinat kartesian dari hiposenter yang sebenarnya adalah (x, y, z) dan koordinat stasiun ke i yang merekam gempa bumi tersebut adalah (x_i, y_i, z_i) . t dan t_i berturut-turut adalah waktu tiba dari gempa dan waktu tiba gelombang gempa pada stasiun ke i . maka dapat dituliskan,

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}{v} \tag{17}$$

Persamaan di atas menjelaskan bahwa t_i adalah elemen dari vektor data d dan x, y, z, t adalah elemen dari vektor model m yang akan dicari nilainya. Elemen data individual d_i berhubungan dengan vektor model disisi kanan. Sehingga dapat dituliskan,

$$F(x, y, z, t) = d \tag{18}$$

Persamaan untuk d adalah nonlinear, maka prosedur standard adalah dengan melinearkan persamaan 18 sehingga dapat diselesaikan dengan sederhana menggunakan metode *least square* untuk persamaan linear. Langkah pertama adalah dengan menebak solusi awal m^0 yang akan terus berubah dengan perubahan seperti dibawah ini,

$$m_j^1 = m_j^0 + \delta m_j^0 \tag{19}$$

Dimana δm_j^0 adalah variasi perubahan dari parameter model ke j yang akan bergerak sampai mencapai hasil yang terbaik. Misal ditentukan tebakan awal adalah (x_0, y_0, z_0, t_0) dan menentukan perubahan dari solusi awal yaitu $\delta x_0 = (x_1 - x_0)$, $\delta y_0 = (y_1 - y_0)$, $\delta z_0 = (z_1 - z_0)$ dan $\delta t_0 = (t_1 - t_0)$. Subskrip berhubungan dengan iterasi yang terjadi. Hubungan perubahan dari vektor data dapat dijelaskan dengan mengekspansikan persamaan 17 menjadi deret Taylor,

$$\frac{\partial F}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial F}{\partial y_0} \delta y_0 + \frac{\partial F}{\partial z_0} \delta z_0 = d_i - F_1^0(x_0, y_0, z_0, t_0) \tag{20}$$

Persamaan 20 memperlihatkan bahwa perbedaan antara hasil observasi dengan data prediksi mempunyai hubungan linear. Nilai derivative didapatkan dari tebakan awal, m_j^0 . Dengan mensubstitusikan persamaan 19 kedalam 20,

$$\delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \delta m_j \tag{21}$$

Atau dapat dinyatakan sebagai komponen dari matriks,

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j} \tag{22}$$

Sehingga dapat dituliskan [3],

$$\Delta d = J \Delta m \tag{23}$$

Dimana J adalah matriks Jacobi yang dievaluasi pada nilai m (parameter model) tertentu. Maka persamaan...mirip dengan persamaan yang berlaku pada hubungan linear antara data dengan parameter model, yaitu $d = Gm$. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa data digantikan oleh perturbasi data dan model digantikan oleh perturbasi model dan matriks Kernel (G) digantikan dengan matriks Jacobi (J). Berdasarkan analogi, solusi inversi dalam bentuk Δm dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\Delta m = [J^T J]^{-1} J^T \Delta d \tag{24}$$

Persamaan 23 menyatakan perturbasi yang diperlukan terhadap model awal agar diperoleh model yang lebih baik (misal, $m_1 = m_0 + \Delta m_0$). Proses perturbasi model dilakukan secara iteratif dengan menggunakan persamaan 24 sampai diperoleh konvergensi menuju solusi optimum.

Untuk memperoleh solusi inversi atau model optimum diperlukan perturbasi secara iteratif dari suatu model awal m_0 . Dengan demikian pada iterasi ke- $(n + 1)$ perturbasi dilakukan terhadap model hasil iterasi sebelumnya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$m_{n+1} = m_n + [J_n^T J_n]^{-1} J_n^T \Delta d_n \quad (25)$$

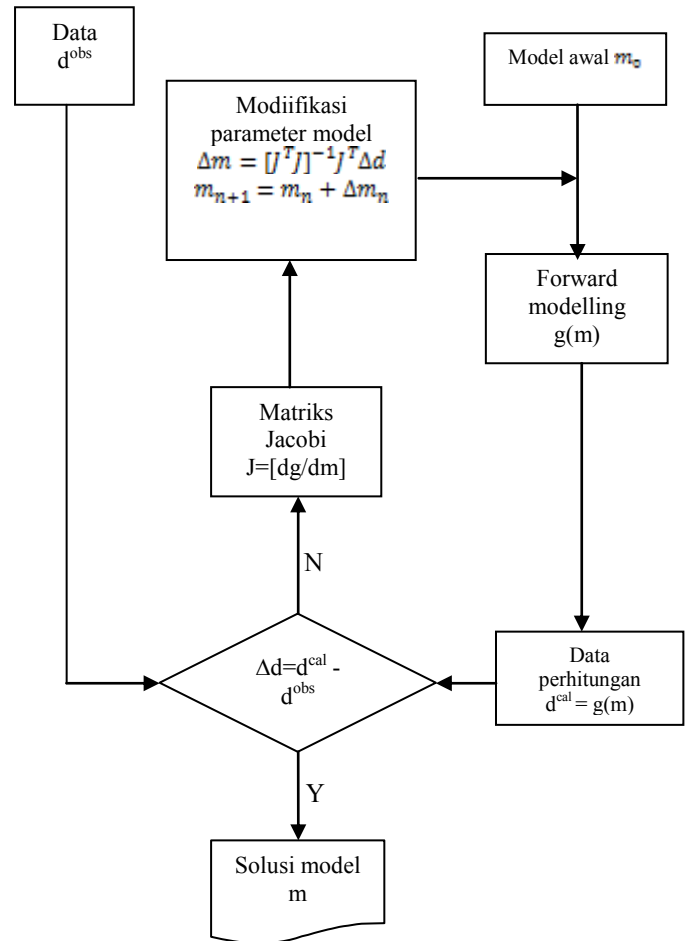
Perhitungan hiposenter merupakan permasalahan inversi nonlinear dengan penyelesaian seperti pada diagram alir pada gambar 1[2].

Ketelitian pengukuran parameter gempa bumi akan memberikan informasi yang lebih akurat. Selain itu, metode perhitungan untuk mencari nilai parameter ini juga akan menjadi hal yang sangat penting, metode penghitungan yang sesuai dan tidak rumit akan dapat memudahkan perhitungan dan menghindari kesalahan-kesalahan saat perhitungan dilakukan. Berdasarkan latar belakang ini, maka dapat diketahui bahwa ketelitian dalam penentuan parameter gempa bumi dan pemilihan metode untuk menghitungnya merupakan hal yang sangat penting. Karena itu, tulisan ini memberikan koreksi dan hasil yang lebih teliti terhadap penentuan parameter gempa bumi berupa hiposenter dari gempa bumi yang ada di Sumatera selatan dengan menggunakan software penelitian berupa hypo71 dan menjelaskan metode yang digunakan Hypo71 dalam perhitungan nilai Hiposenter tersebut.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi yang terjadi di daerah Sumatera Selatan yang terletak pada $0^{\circ}50' \text{ LS} - 4^{\circ}40' \text{ LU } 96^{\circ}40' - 100^{\circ}50' \text{ BT}$ pada rentang waktu antara 1 Januari 2010 sampai 14 September 2012. Data yang digunakan adalah data gempa dengan *magnitudo* gempa diatas 5 SR karena gempa dengan magnitudo tersebut akan dapat terekam dan terbaca di banyak stasiun. Selain itu, data gempa yang diambil adalah gempa lokal dengan jarak pusat gempa ke stasiun pencatat terletak antara 0 sampai 10^0 . Data diperoleh melalui www.WebDC.eu dalam format .openssl. Data yang digunakan adalah data gempa bumi dengan arah 3 komponen kartesian (W-N, E-S, dan horizontal-Z). Selanjutnya format data dirubah menjadi .seed dengan menggunakan *software* openssl-0.9.8g_win32. Kemudian diubah dalam format .SAC menggunakan *software* JrdseedVer0.10.1.

Setelah data diubah dalam format .SAC, dengan menggunakan *software* Winquake dapat dilakukan penentuan waktu tiba gelombang P dan S. Data yang didapat dari proses ini adalah waktu datang gelombang P, waktu datang gelombang S dan posisi dari stasiun berupa nilai *latitude* dan *longitude* nya. Setelah mendapat 3 data tersebut, proses berlanjut dengan menggunakan *software* hypo 71. Dalam *software* ini terdapat 3 jenis file, yaitu file berbentuk .INP yang merupakan input file, .PRT yang merupakan file output dan .PUN yang merupakan *punched file*. Pada proses *input file*, dimasukkan 3 jenis data, yaitu data stasiun yang meliputi nama stasiun dan letak stasiun, model bumi berupa kedalaman dan kecepatan gelombang P dan fase gelombang P dan S yang meliputi nilai waktu datang gelombang datang P dan S dan jenisnya. Model bumi



Gambar 1 diagram alir penyelesaian inversi nonlinear

yang digunakan pada penelitian ini adalah model bumi untuk pulau Sumatera pada variasi kedalaman 0-40 km yang merupakan kombinasi dari model bumi Santosa[10] dan Haslinger[8]. Pada tahap ini, dimasukkan pula nilai tebakan hiposenter awal pada bagian *control card* selain itu juga dilakukan pengaturan terhadap nilai-nilai yang ada di bagian ini untuk mengontrol jalannya pengolahan data atau iterasi yang akan dilakukan. Setelah itu dilakukan *running* terhadap data tersebut dan didapatkan *output file* berupa nilai hiposenter dari gempa tersebut.

Setelah didapatkan output yang diharapkan yaitu berupa nilai hiposenter dari gempa bumi, dilakukan penggambaran atau pemetaan hiposenter tersebut. tahap ini dilakukan dengan menggunakan *software* *Generic Mapping Tools* (GMT). Penggunaan GMT ini dimulai dengan memasukkan input file dengan format yang telah ditentukan dan kemudian akan didapatkan *output file* berupa gambar letak hiposenter dan letak episenter dari semua data gempa.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Metode Penyelesaian dengan Model Inversi

Misal koordinat untuk stasiun ke-i adalah (x_i, y_i, z_i) dan *arrival time* berdasarkan observasi adalah τ_i dan t_i adalah *arrival time* yang dihitung berdasarkan tebakan awal (contoh, diasumsikan *origin time* (t) dan hiposenter (x,y,z)). Dengan menggunakan pendekatan deret Taylor sampai turunan orde pertama didapatkan,

$$\tau_i = t_i + dt + \frac{\partial t_i}{\partial x} dx + \frac{\partial t_i}{\partial y} dy + \frac{\partial t_i}{\partial z} dz + e_i \quad (26)$$

$$\tau_i - t_i = R_i = dt + \frac{\partial t_i}{\partial x} dx + \frac{\partial t_i}{\partial y} dy + \frac{\partial t_i}{\partial z} dz + e_i \quad (27)$$

Selanjutnya digunakan metode least square yaitu dengan meminimumkan jumlah kuadrat dari nilai error. Suatu fungsi dikatakan minimum ketika turunan pertamanya terhadap variabel yang tidak diketahui adalah nol, sehingga didapatkan,

$$\begin{aligned} ndt + \sum a_i dx + \sum b_i dy + \sum c_i dz &= \sum R_i \\ \sum a_i dt + \sum a_i^2 dx + \sum a_i b_i dy + \sum a_i c_i dz &= \sum a_i R_i \\ \sum b_i dt + \sum b_i a_i dx + \sum b_i^2 dy + \sum b_i c_i dz &= \sum b_i R_i \\ \sum c_i dt + \sum c_i a_i dx + \sum c_i b_i dy + \sum c_i^2 dz &= \sum c_i R_i \end{aligned} \quad (28)$$

Dimana,

$$a_i = \frac{\partial t_i}{\partial x}; b_i = \frac{\partial t_i}{\partial y}; c_i = \frac{\partial t_i}{\partial z} \quad (29)$$

Dapat dilihat bahwa hubungan antara data dan parameter model kini sudah menjadi persamaan linear, dimana dapat disederhanakan dalam bentuk matriks berikut,

$$\Delta d = J \Delta m \quad (30)$$

Dengan J adalah matriks jacobian yang mengandung nilai-nilai turunan fungsi t terhadap 4 parameter model dan Δd serta Δm adalah perturbasi dari data dan parameter model.

Pencarian nilai Δm dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan matriks. Solusi dari Δm dapat didapatkan dengan menggunakan metode regresi.

Persamaan 27 dapat dituliskan,

$$e_i = Y_i - B_o - \sum_{j=1}^3 B_j X_{j,i}, \text{ untuk } i = 1 \text{ sampai } n \quad (31)$$

Jika terdapat stasiun dengan data gelombang S dan P, maka persamaan dapat dimodifikasi menjadi,

$$e_i = Y_i - X_{0,i} B_o - \sum_{j=1}^3 B_j X_{j,i}, \text{ untuk } i = 1 \text{ sampai } n \quad (32)$$

Dimana, $Y_i = R_i$, $B_o = dt$, $B_1 = dx$, $B_2 = dy$, $B_3 = dz$, $X_{1,i} = \frac{\partial t_i}{\partial x}$, $X_{2,i} = \frac{\partial t_i}{\partial y}$, $X_{3,i} = \frac{\partial t_i}{\partial z}$, $X_{0,i} = 1$ (untuk S atau P interval data), 0 (untuk S-P interval data).

Misal $Q = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - X_{0,i} B_o - \sum_{j=1}^3 B_j X_{j,i}]^2$

Dengan meminimalkan nilai Q diperoleh,

$$X_{0,i} X_{0,i} B_o + \sum_{j=1}^3 B_j X_{0,i} X_{j,i} = X_{0,i} Y_i \quad (32)$$

$$X_{1,i} X_{0,i} B_o + \sum_{j=1}^3 B_j X_{1,i} X_{j,i} = X_{1,i} Y_i$$

$$X_{2,i} X_{0,i} B_o + \sum_{j=1}^3 B_j X_{2,i} X_{j,i} = X_{2,i} Y_i$$

$$X_{3,i} X_{0,i} B_o + \sum_{j=1}^3 B_j X_{3,i} X_{j,i} = X_{3,i} Y_i$$

Pertama, kita dapat menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai B_o . Misalkan,

$$X_{0,i} X_{0,i} = m \quad (33)$$

Dan definisi $V_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n X_{0,i} V_{j,i}$

Maka didapatkan $B_o = Y - \sum_{j=1}^3 B_j X_j$

Dengan mensubstitusikan persamaan B_o ke tiga persamaan lainnya. Persamaan ke-k (k=1,2,3) menjadi

$$X_{k,i} X_{0,i} Y + \sum_{j=1}^3 (B_j X_{k,i} X_{j,i} - B_j X_{k,i} X_{0,i} X_j) = X_{k,i} Y_i \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^3 (X_{k,i} - X_{0,i} X_k) (X_{j,i} - X_{0,i} X_j) B_j = (X_{k,i} - X_{0,i} X_k) (Y_i - X_{0,i} Y) \quad (35)$$

Dari persamaan diatas, nilai B_j yang merupakan nilai Δm dapat didapatkan dengan berbagai metode. Namun, pada

program Hypo71 digunakan metode Doolittle yang merupakan variasi dari metode eliminasi Gauss [13].

B. Relokasi Hiposenter

Untuk relokasi Hiposenter menggunakan Hypo71, digunakan 48 data gempa bumi di Sumatera Selatan. Proses perhitungan dimulai dengan memasukkan nilai tebakan awal hiposenter untuk masing-masing gempa bumi. Data yang dimasukkan adalah berupa data letak stasiun yang merekam kejadian gempa, model bumi 1 dimensi, dan waktu datang gelombang P dan S yang terbaca pada tiap stasiun yang merekam gelombang gempa. Model bumi yang digunakan adalah kombinasi model bumi Haslinger dan Santosa. Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Madlazim Kasmolan[9], model bumi ini adalah model bumi yang paling cocok untuk Pulau Sumatera. Hal ini ditandai dengan lebih kecilnya error yang didapatkan ketika perhitungan dilakukan dengan menggunakan model bumi ini dibandingkan dengan menggunakan model bumi lainnya. Model bumi ini dapat dilihat pada tabel 1.

Dari proses relokasi didapatkan nilai rms yang beragam. Nilai rms ini merupakan nilai residu atau selisih antara data sebenarnya atau dalam kasus ini adalah origin time menurut pengamatan dengan origin time yang dihitung berdasarkan hasil hiposenter yang didapatkan (model forward). Nilai ini akan menunjukkan keakuratan dari nilai parameter model yang diperoleh. Ketika nilai RMS yang diperoleh kecil, maka nilai parameter model yang dihasilkan adalah mendekati nilai sebenarnya. Besar kecilnya nilai RMS sangat dipengaruhi oleh penentuan nilai tebakan awal dari parameter model. Karena itu, pencarian nilai parameter model dengan menggunakan metode ini tidak selalu akurat. Faktor lain yang dapat mempengaruhi keakuratan dari hasil yang didapatkan adalah keakuratan pemilihan nilai waktu tiba gelombang P dan S yang dilakukan pada proses pengolahan data menggunakan Winquake.

Gambar 2 menunjukkan posisi episenter sebelum dan sesudah relokasi, Warna merah merupakan posisi sebelum relokasi dan warna putih adalah posisi setelah relokasi. Gambar 3 menunjukkan posisi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi dan warna hitam menunjukkan posisi setelah relokasi dan warna merah adalah posisi setelah relokasi. Terlihat bahwa posisi mengalami pergeseran setelah dilakukan relokasi.

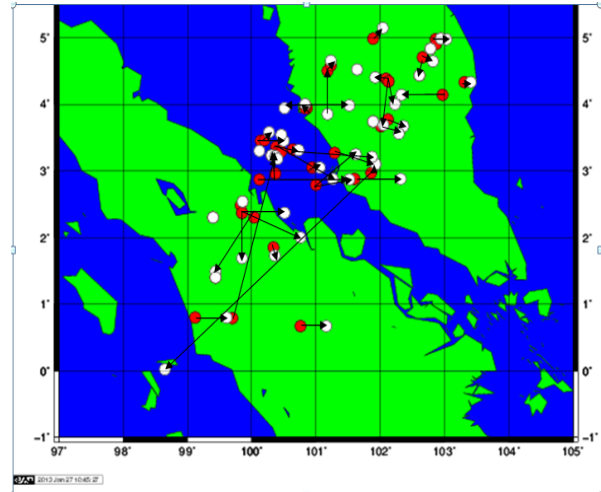
IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merelokasi posisi hiposenter dengan menggunakan *software* Hypo71 dimana terdapat pergeseran posisi antara sebelum relokasi dan sesudah relokasi. Relokasi hiposenter dengan *software* Hypo71 ini dilakukan dengan menggunakan metode *Least square*. Perhitungan dengan *software* ini menghasilkan nilai rms yang beragam yang masing-masing dipengaruhi oleh pemilihan nilai solusi awal dan ketepatan dalam melakukan *picking* gelombang P dan S pada pengolahan data.

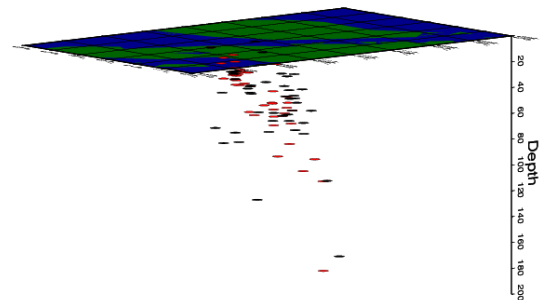
DAFTAR PUSTAKA

- [1] [1]Garland. G.D, 1979. "Introduction to Geophysics 2th ". Toronto:W.B.Saunders Company.
- [2] [2]Grandis, Hendra. 2009. "Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika". Bandung:HAGI
- [3] [3]Lay, T. Dan Wallace, T.C. 1995. "Modern Global Seismologi". California:Academic Press

[4] [4]Santosa, B.J. 2002. "Modul Ajar Seismologi". Surabaya:ITS
 [5] [5]Sumner, J.S. 1970. "Geophysics, Geologic structure and tectonics 2th". Dubuque:Wm.C.Brown Company Publisher.
 [6] [6]Supriyanto. 2007. "Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi". Depok: Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia
 [7] [7]Gunawan. 1985. "Penentuan Hiposenter dan Origin Time Gempa Lokal Dengan Metode Geiger". Thesis. UGM.
 [8] [8]Haslinger F., Kissling E., Ansorge J., Hatzfeld D., Papadimitriou E., Karakostas V., Makropoulos K., Kahle H.G., Peter Y., "3D Crustal Structure From Local Earthquake Tomography Around the Gulf of Arta (Ionian region, NW Greece)", Tectonophysics. 1999. 304. 201-218
 [9] [9]Ihsan,M. 2008. Analisa Ketahanan Gempa. Universitas Indonesia.
 [10] [10]Kasmolan M, Santosa B.J., Lees J.M., Utama W., 2010. "Earthquake Source Parameters at the Sumatran Fault Zone: Identification of the Activated Fault Plane". Central European Journal of Geosciences. 455-474
 [11] [11]Santosa B.J., "Analyzing the Seismogram of Earthquake on Sumatra-Java Subduction Plane at CHTO Observation Station", journal MIPA, 2005, 13, 23-29.
 [12] [12]Susilawati. 2008. "Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian dalam Bumi". USU e-Repository.
 [13] [13]Lee dan Lahr. 1975. "HYPO71(Revised) : A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude, and First Motion Pattern of Local Earthquakes". California:United States Department of Interior Geological Survey.
 [14] [14]http://www.bmkg.go.id/bmkg_pusat/Geofisika/gempabumi.bmkg
 [15] [15]<http://www.earthquakes.usgs.gov/>



Gambar 2 posisi episenter sebelum dan sesudah relokasi



Gambar 3 posisi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi

Tabel 1 Model bumi Kombinasi Santosa dan Haslinger

Kedalaman (km)	V _p (km/s)	V _s (km/s)
0	2.31	1.3
1	4.27	2.4
2	5.52	3.1
5	6.23	3.5
16	6.41	3.6
33	6.70	4.7
40	8.00	4.76