

Hypocenter Determination of Microearthquake Data in Geothermal Area Using MATLAB

Muhamad Ryan Fauzi¹, Yunus Daud² and Surya Aji Pratama³

¹Geothermal Laboratory, Department of Physics, The University of Indonesia

²Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

³PT NewQuest Geotechnology, Indonesia

muryfa@gmail.com

Keywords: microearthquake; Geiger method; hypocenter; software.

ABSTRACT

The study of monitoring in geothermal field can be a strategy to sustain the existence of the reservoir. One method for monitoring the geothermal field is MEQ method. The availability of software to process MEQ data is still limited and relatively expensive. Thus the author seeks to conduct research in the development of program for processing MEQ data. The research focuses on the creation of MATLAB-based program for processing MEQ data from arrival time to get the location of hypocenter. The steps of arrival time data processing include station correction, origin time determination with Wadati Plot, trial hypocenter determination, and iterative process to obtain the hypocenter with Geiger method. The results of arrival time data processing with the program that has been created (Pro-M) show excellent results. The synthetic data processing results show that RMS error value is less than 0.001. Real data processing results show that the hypocenter location is appropriate with the geological structure and magnetotelluric data with the average RMS error is 0.1.

PENDAHULUAN

Salah satu aplikasi seismologi yang digunakan untuk monitoring reservoir adalah melalui metode *Microearthquake* (MEQ). Monitoring dengan metode MEQ merupakan metode yang baik untuk mengeksplorasi reservoir panasbumi (Miyazaki, 1995). Metode MEQ menganalisa gempa-gempa kecil yang memiliki skala di bawah 3 SR (Kayal, 2008). Sumber gempa tersebut dapat berasal dari aktivitas produksi dan reinjeksi yang berkaitan dengan rekahan (*fracture*) pada batuan reservoir. Rekahan tersebut dapat menggambarkan pergerakan fluida yang merupakan zona permeabel dari lapangan panasbumi. Melalui metode MEQ maka lokasi zona permeabel pada lapangan panasbumi dapat ditentukan.

Penentuan hiposenter merupakan rangkaian proses pengolahan data MEQ. Sangat diperlukan sebuah program yang dapat melakukan proses pengolahan data *microearthquake* untuk menentukan lokasi hiposenter secara akurat. Salah satu program yang digunakan untuk melakukan pengolahan data MEQ adalah Hypo71. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan program berbasis MATLAB untuk dapat melakukan pengolahan data *microearthquake* dari waktu tiba (*arrival time*) hingga mendapat lokasi hiposenter.

TINJAUAN PUSTAKA

Metode Geiger (Geiger, 1912) menerapkan algoritma metode Gauss-Newton yang digunakan untuk memecahkan permasalahan nonlinier (Lee and Stewart, 1981). Metode ini dijelaskan dalam bentuk polinomial Taylor orde-satu dengan solusi *least-squares* untuk sistem linier. Persamaan fungsi arrival time pada sensor ke-*i* dapat dijelaskan dalam bentuk $f_i(\mathbf{x})$, dimana \mathbf{x} merupakan parameter hiposenter:

$$\mathbf{x} = (x, y, z, t)^T. \quad (1)$$

Parameter x , y , dan z adalah koordinat dari event dan t adalah *origin time* dari event. Kemudian $f_i(\mathbf{x})$ diekspansikan pada \mathbf{x}_0 , dan diekspresikan dengan polinomial Taylor orde-satu:

$$f_i(\mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}_0) = f_i(\mathbf{x}_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t} \delta t \quad (2)$$

dimana

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}_0, \\ \mathbf{x}_0 &= (x_0, y_0, z_0, t_0)^T, \\ \delta\mathbf{x}_0 &= (\delta x, \delta y, \delta z, \delta t)^T. \end{aligned}$$

Lokasi \mathbf{x}_0 merupakan lokasi prediksi atau solusi trial dari suatu event. Lokasi prediksi ini bisa dimasukkan sendiri atau juga bisa didapat dari iterasi sebelumnya dan selalu sudah diketahui pada iterasi pertama. Fungsi $f_i(\mathbf{x}_0)$ merupakan besaran yang sudah diketahui dan disebut sebagai *calculated arrival time*. Besaran tersebut didapat dengan memasukkan nilai prediksi, \mathbf{x}_0 , sebagai lokasi hiposenter ke dalam persamaan fungsi arrival time.

Pada persamaan (2), $f_i(\mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}_0)$ merepresentasikan waktu tiba yang terekam pada sensor ke-*i* dan disebut sebagai *observed arrival time*. Berdasarkan persamaan (2), *observed arrival time* merupakan penjumlahan fungsi arrival time yang dihitung pada sembarang lokasi prediksi (*calculated arrival time*) dengan fungsi turunan:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t} \delta t, \quad (3)$$

yang disebut sebagai vektor koreksi. Turunan parsial dari fungsi *arrival time* tersebut merupakan besaran yang sudah diketahui sebagaimana dapat ditentukan secara numerik berdasarkan pada lokasi prediksi.

Solusi pada persamaan (2) adalah mencari nilai \mathbf{x}_0 sehingga nilai *calculated arrival time* akan sama dengan *observed arrival time* dan \mathbf{x}_0 dapat dijadikan sebagai hiposenter dari event. Proses iterasi untuk mencari solusi persamaan (2) berlangsung secara otomatis dimana nilai solusi trial pada iterasi berikutnya diperbarui dengan menambahkan $\delta\mathbf{x}_0$ pada solusi trial sebelumnya hingga mendapatkan selisih antara *calculated arrival time* dan *observed arrival time* yang sesuai. Solusi untuk menentukan nilai $\delta\mathbf{x}_0$ dapat dijelaskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_i}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f_i}{\partial z} \delta z + \frac{\partial f_i}{\partial t} \delta t = \gamma_i \quad (4)$$

dimana

$$\begin{aligned} \gamma_i &= t_{oi} - t_{ci} \\ t_{oi} &= f_i(x) \\ t_{ci} &= f_i(x_0) \end{aligned}$$

Dalam notasi matriks, persamaan (4) dapat ditulis menjadi:

$$G \delta x_0 = \gamma \quad (5)$$

dengan

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \frac{\partial f_n}{\partial y} & \frac{\partial f_n}{\partial z} & \frac{\partial f_n}{\partial t} \end{bmatrix},$$

$$\delta x_0 = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta t \end{bmatrix}, \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix}.$$

Solusi *least square* dari persamaan (5) adalah nilai vektor koreksi yang memenuhi

$$\delta x_0 = (G^T G)^{-1} G^T \gamma \quad (6)$$

Kesesuaian antara *observed arrival time* dengan *calculated arrival time* disebut sebagai *event residual* yang didefinisikan oleh solusi *least square* (Ge, 1988) yang diperoleh melalui:

$$Res = \sqrt{\frac{\gamma^T \gamma}{n - q}} < \epsilon \quad (7)$$

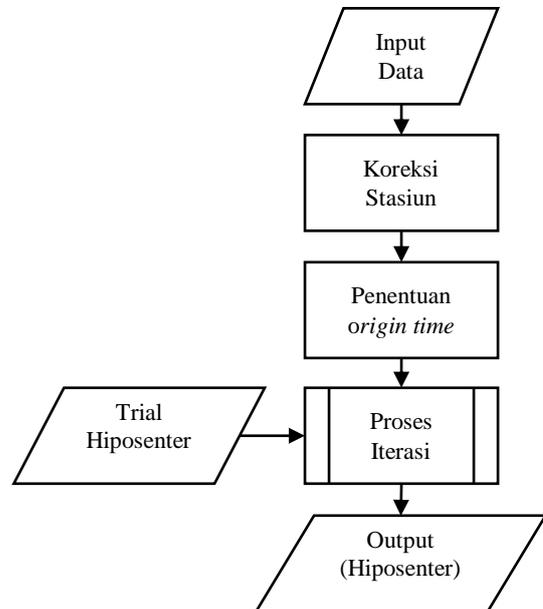
dimana n adalah jumlah persamaan, q adalah derajat kebebasan, dan ϵ adalah nilai kriteria yang diinginkan. Jumlah derajat kebebasan untuk parameter di persamaan (4) adalah 4.

Solusi δx yang telah didapatkan pada persamaan (6) menjadi vektor koreksi yang akan ditambahkan ke nilai solusi trial awal (x_0) untuk dijadikan solusi trial yang baru ($x_0 + \delta x_0$). Perbaruan nilai solusi trial ini dijadikan parameter iterasi hingga nilai minimum kesalahan mencapai kriteria yang diinginkan. Ketika iterasi sudah berhenti, maka nilai akhir dari solusi trial merupakan nilai dari lokasi hiposenter.

METODE PENELITIAN

Pembuatan program dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB, yakni dengan membuat *script* di Editor MATLAB yang dapat menjalankan algoritma yang diberikan agar bisa menentukan lokasi hiposenter dari MEQ. Program tersebut kemudian diberi nama Pro-M. Diagram alir dari program pengolahan data MEQ menggunakan MATLAB dapat dilihat pada Gambar 1.

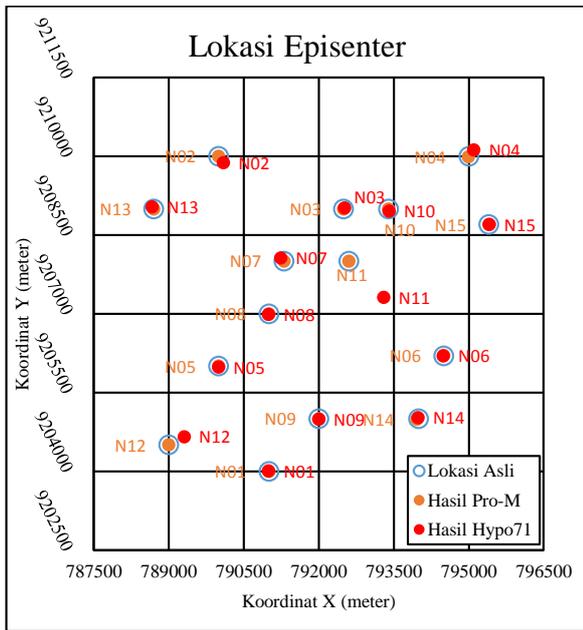
Metode yang dilakukan oleh program dalam mencari (menghitung) lokasi hiposenter adalah dengan proses iterasi. Proses iterasi merupakan bagian terpenting dari rangkaian pembuatan program untuk perhitungan hiposenter. Proses iterasi dimulai dengan memasukkan lokasi hiposenter prediksi. Iterasi terus berlangsung dan akan berhenti ketika nilai *stopping criteria* sudah tercapai. Ketika iterasi berhenti maka akan didapatkan hasil berupa lokasi hiposenter akhir. Proses iterasi yang dilakukan Pro-M meliputi beberapa langkah perhitungan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



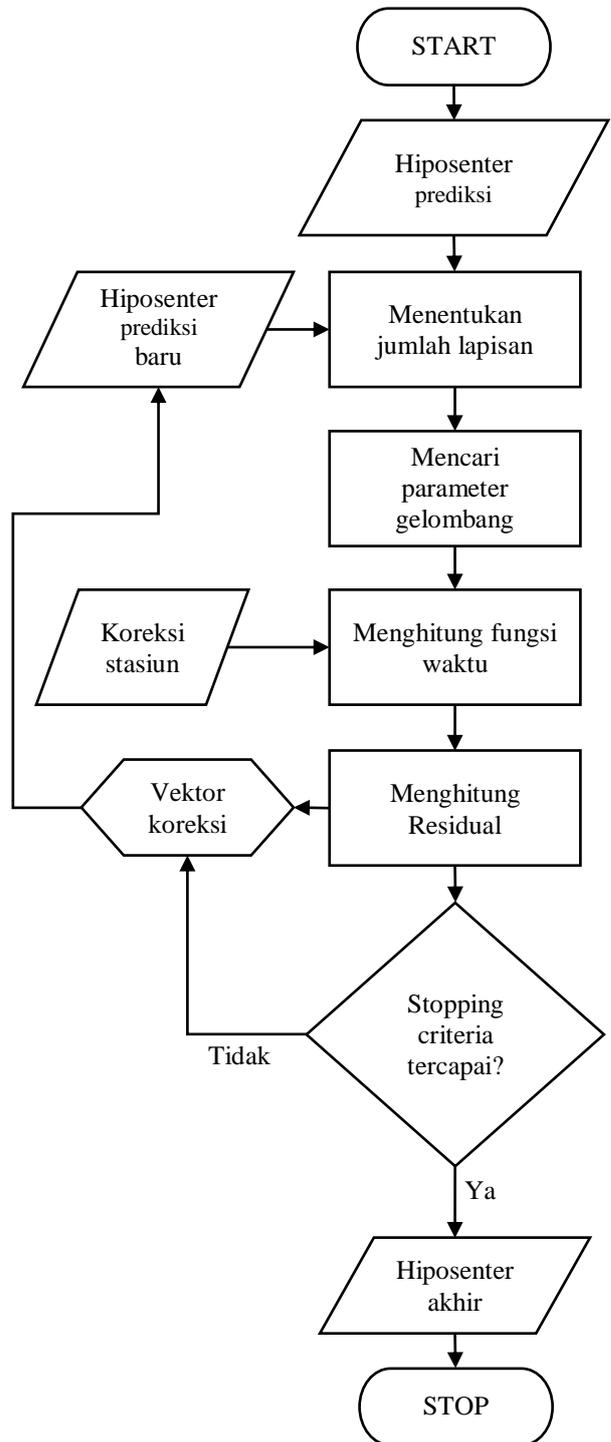
Gambar 1. Diagram alir program pengolahan data MEQ di MATLAB.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan episenter hasil pengolahan data sintetik ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3 tampak perbedaan hasil pengolahan data dengan Pro-M dan Hypo71. Hasil dari Pro-M menunjukkan bahwa episenter terletak berhimpit dengan lokasi yang sebenarnya. Sedangkan beberapa data hasil dari Hypo71 berada cukup jauh dari episenter yang sebenarnya. Pada penampang melintang di Gambar 4 juga menunjukkan bahwa hasil Pro-M lebih baik daripada Hypo71 karena lebih mendekati (berhimpit) dengan lokasi sebenarnya sedangkan beberapa data hasil Hypo71 berada jauh dari kedalaman yang sebenarnya.



Gambar 3. Perbandingan episenter hasil pengolahan data sintetik antara Pro-M dengan Hypo71.



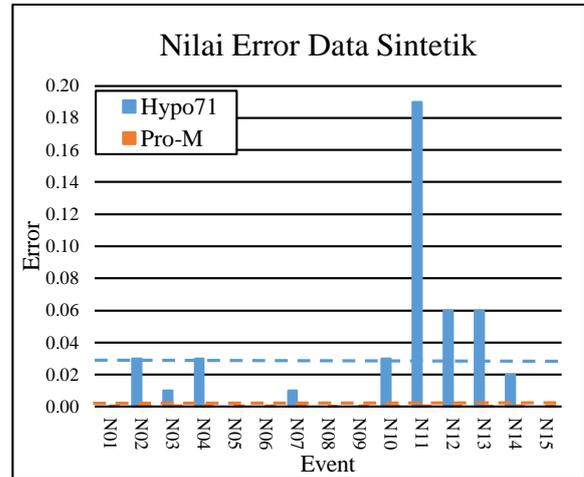
Gambar 2. Diagram alir proses iterasi untuk perhitungan hiposenter.

Perbedaan hasil pengolahan data sintetik antara Pro-M dengan Hypo71 juga dapat dilihat dari nilai kesalahannya. Gambar 5 memperlihatkan grafik nilai kesalahan hasil pengolahan data dengan Pro-M dan Hypo71. Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai kesalahan dari Pro-M relatif sangat rendah dibandingkan nilai kesalahan dari Hypo71. Oleh karena itu, nilai kesalahan dari Pro-M dapat dijadikan pertimbangan sejauh mana keakuratan perhitungan yang dilakukan. Hal tersebut juga didukung dari hiposenter dan waktu asal hasil pengolahan data yang tidak jauh berbeda dengan data sebenarnya.

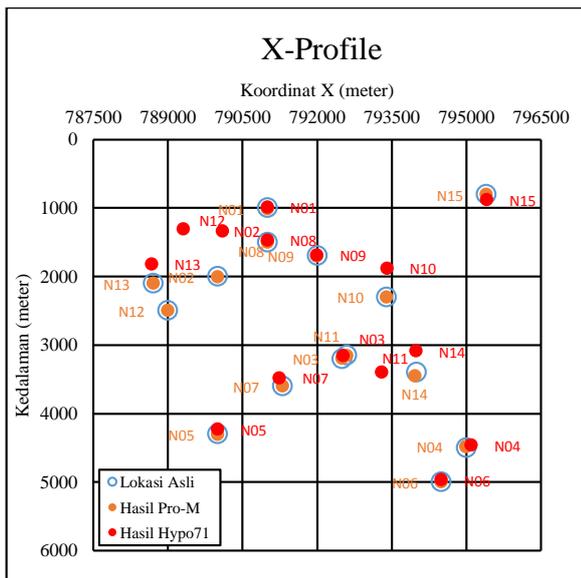
Data sintetik merupakan keadaan yang ideal untuk melakukan perhitungan hiposenter. Pada stasiun pengukuran, waktu tiba gelombang P dan S untuk data sintetik dari tiap-tiap event

bernilai tepat. Berbeda dengan kondisi riil dimana sinyal yang terdapat di seismogram memiliki banyak gangguan sehingga sulit untuk menentukan waktu tiba gelombang P dan S. Keadaan ideal lainnya adalah data sintetik menggunakan model kecepatan yang sederhana (1 dimensi) sehingga memudahkan perhitungan.

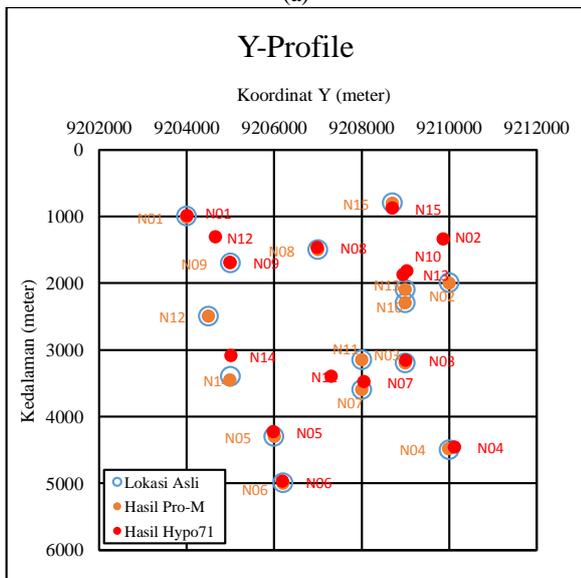
Program yang digunakan, baik Pro-M maupun Hypo71, juga menggunakan keadaan ideal tersebut bahwa waktu tiba dan model kecepatan bawah permukaan sebagaimana yang terdapat pada data input adalah benar sehingga tidak mungkin muncul kesalahan perhitungan yang sangat besar. Dengan demikian seharusnya hasil pengolahan data sintetik bernilai akurat baik di Pro-M maupun di Hypo71. Kenyataannya Pro-M memiliki keakuratan yang lebih baik dibanding Hypo71. Hal ini dapat menjadi referensi bahwa hasil perhitungan Pro-M dapat dipertanggungjawabkan untuk perhitungan data lainnya (data riil).



Gambar 5. Perbandingan nilai kesalahan hasil pengolahan data sintetik antara Pro-M dengan Hypo71.



(a)



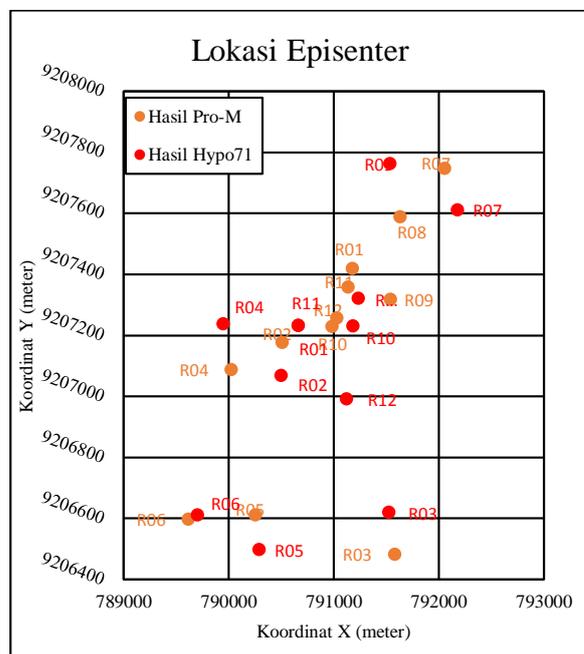
(b)

Gambar 4. Perbandingan kedalaman hasil pengolahan data sintetik antara Pro-M dengan Hypo71. (a) penampang X dan (b) penampang Y.

Perbandingan episenter hasil pengolahan data riil ditunjukkan pada Gambar 6. Perbedaan jarak episenter antara hasil Pro-M dengan Hypo71 dapat mencapai sekitar 500 meter. Sedangkan perbedaan jarak hiposenter dapat mencapai sekitar 700 meter. Perbedaan kedalaman dari tiap-tiap event hasil pengolahan Pro-M dan Hypo71 terdapat pada Gambar 7.

Kondisi data riil sudah jelas bersifat lebih kompleks dibandingkan dengan data sintetik sehingga sulit mencapai nilai kesalahan yang sangat kecil sebagaimana hasil pengolahan data sintetik. Hal ini berkaitan dengan analisa data sinyal yang diperoleh. Saat melakukan *picking* bisa saja terjadi salah memilih *first break* waktu tiba gelombang P dan S karena akan memengaruhi perhitungan waktu asal dan fungsi waktu dari gelombang.

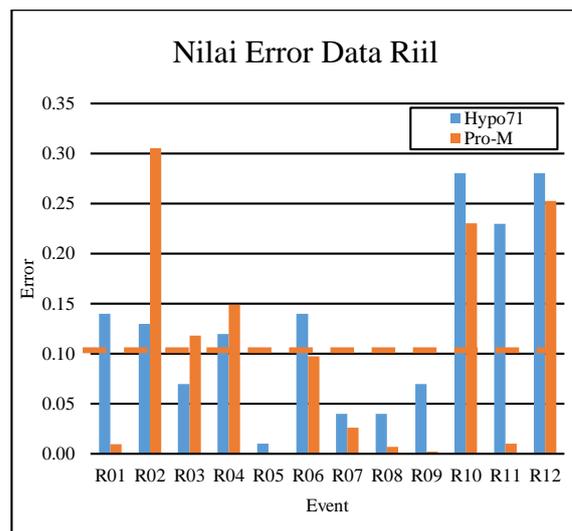
Selain kesalahan ketika *picking* waktu tiba, penentuan model kecepatan yang digunakan juga menentukan hasil perhitungan. Model kecepatan pada kondisi riil tidak bisa dengan mudah disederhanakan menjadi 1 dimensi. Meskipun penggunaan model kecepatan 1 dimensi ini merupakan pendekatan, tetap saja akan memengaruhi perhitungan lokasi hiposenter.



Gambar 6. Perbandingan episenter hasil pengolahan data riil antara Pro-M dengan Hypo71.

Hasil perhitungan oleh Pro-M maupun Hypo71 setidaknya dapat dijadikan suatu pendekatan untuk mengetahui distribusi hiposenter gempa pada suatu wilayah. Keakuratan perhitungan dapat dilihat dari kualitas nilai kesalahan atau dapat dibandingkan juga dengan data geofisika yang lain.

Perbandingan nilai kesalahan dari Pro-M dengan Hypo71 ditunjukkan pada Gambar 8. Dapat dilihat pada Gambar 8 perbedaan nilai kesalahan tiap *event* dari Pro-M dengan Hypo71 tidak terlalu signifikan. Sebagian besar hasil Pro-M menunjukkan nilai kesalahan yang relatif lebih rendah dari Hypo71. Dari hasil tersebut dapat terlihat bahwa Pro-M bisa dikatakan lebih akurat dari Hypo71 karena nilai kesalahannya relatif lebih rendah. Pernyataan tersebut dapat diperkuat sebagaimana Pro-M melakukan pengolahan data sintetik dengan nilai kesalahan yang lebih rendah dibanding dengan Hypo71. Selain itu dapat dilihat juga pola distribusi hiposenter dari hasil Pro-M memiliki kesesuaian dengan hiposenter hasil Hypo71.

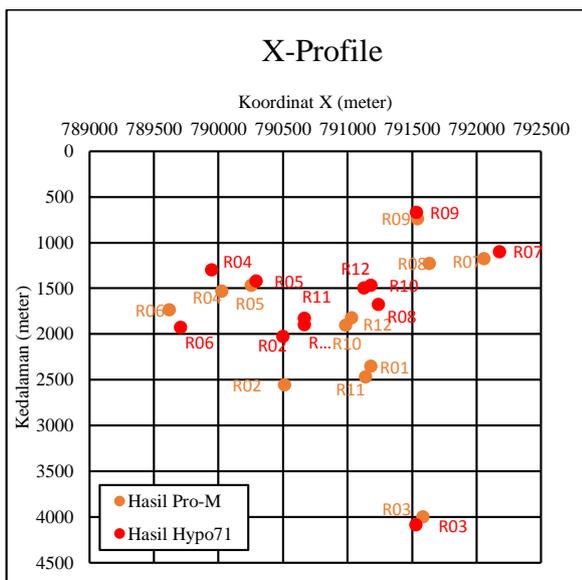


Gambar 8. Perbandingan nilai kesalahan hasil pengolahan data riil antara Pro-M dengan Hypo71.

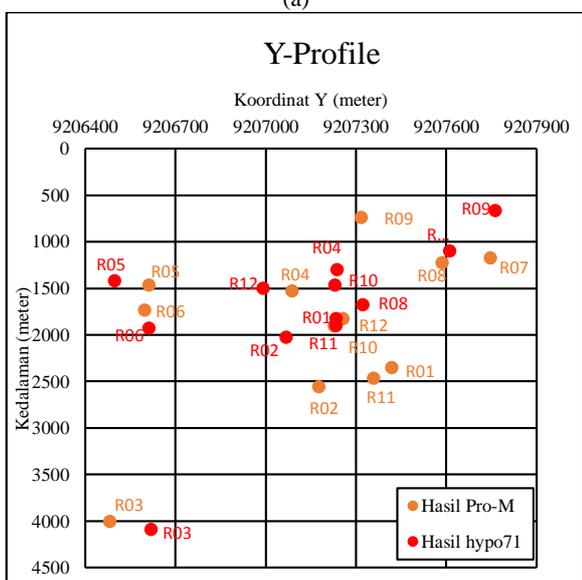
Distribusi episenter perlu dikonfirmasi dengan data struktur geologi untuk melihat kesesuaian hasil pengolahan data. Data struktur geologi didapat dari Munaziyi (2013). Pada Gambar 9 dapat dilihat hubungan antara episenter dengan struktur geologi. Beberapa data dari Pro-M maupun Hypo71 memiliki kesesuaian dengan struktur geologi. Terdapat juga data yang bisa merepresentasikan adanya struktur sekunder (garis putus-putus) di bawah permukaan yang dapat terjadi karena proses reinjeksi.

Menurut Munaziyi (2013) nilai dip dari struktur geologi lebih besar 80° sehingga jika dilihat dalam distribusi episenter sebagaimana pada Gambar 9, episenter tidak terpaut jauh dari struktur geologi yang tampak pada permukaan bumi. Oleh karena itu hasil pengolahan data dari Pro-M memiliki kesesuaian dengan data struktur geologi.

Tidak hanya data struktur geologi yang dapat menjadi acuan untuk konfirmasi distribusi hiposenter namun juga dapat dilakukan pada data geofisika. Data geofisika yang digunakan adalah data *Magnetotelluric* (MT) yang menunjukkan sifat resistivitas dari lapangan panasbumi. Data MT juga didapat dari Munaziyi (2013).

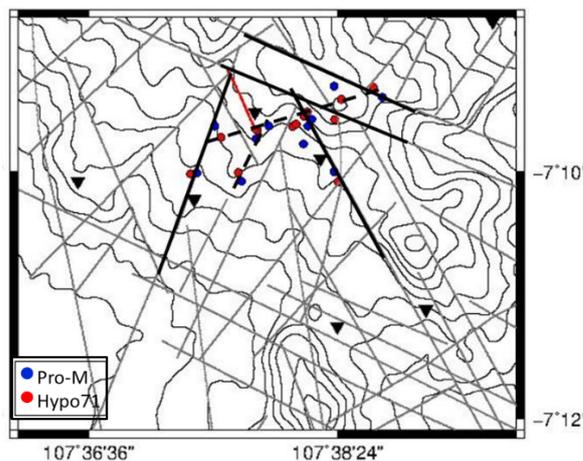


(a)



(b)

Gambar 7. Perbandingan kedalaman hasil pengolahan data riil antara Pro-M dengan Hypo71. (a) penampang X dan (b) penampang Y.

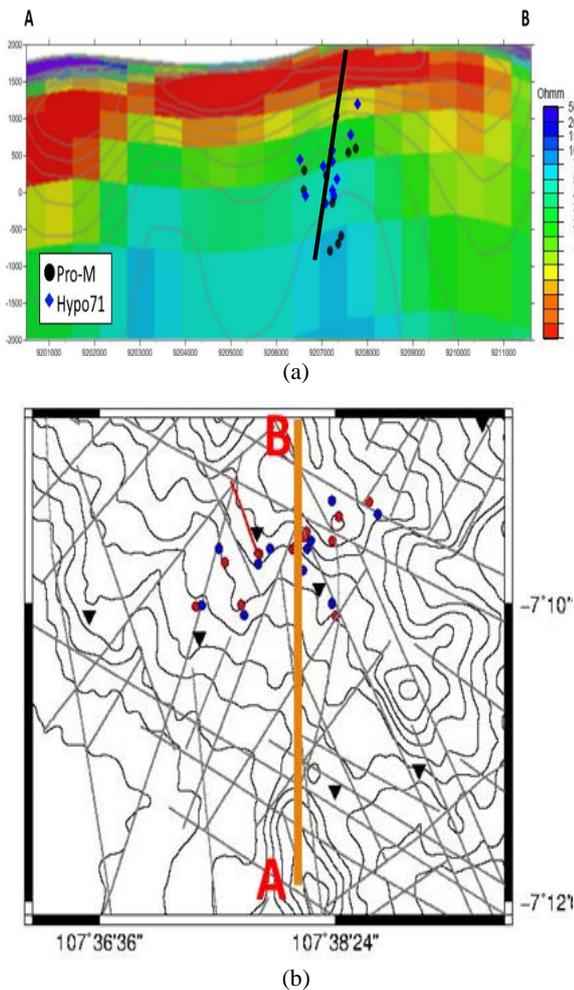


Gambar 9. Distribusi episenter hasil Pro-M dan Hypo71.

Berdasarkan sifat resistivitasnya, sistem panasbumi dapat dijelaskan dengan baik. Resistivitas rendah yang dekat dengan permukaan menunjukkan daerah alterasi. Daerah alterasi tersebut merupakan batuan yang menjadi *cap* (penutup) pada sistem panasbumi. Reservoir panasbumi biasanya memiliki resistivitas yang lebih tinggi dimana dipengaruhi oleh mineral batuan, fluida, dan temperatur batuanya. Resistivitas tinggi berada pada daerah cukup dalam dan biasanya merupakan batuan *heat source* sistem panasbumi.

Menurut Onacha *et al.* (2005) kumpulan distribusi hiposenter yang terjadi di sistem panasbumi berada di batuan pada batas antara resistivitas tinggi (*heat source*) dengan resistivitas yang lebih rendah (reservoir). Pada daerah batas tersebut sering terjadi rekahan batuan yang disebabkan oleh intrusi magma dari *heat source* menuju batuan reservoir sehingga memunculkan gempa di daerah tersebut.

Pada Gambar 10 terdapat distribusi hiposenter yang berkaitan dengan data MT. Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa distribusi hiposenter hasil Pro-M dan Hypo71 berada di antara batuan dengan resistivitas tinggi dan rendah, yakni di sekitar daerah reservoir. Selain itu, distribusi hiposenter juga terdapat pada daerah sekitar patahan. Hal tersebut dapat membuktikan bahwa hasil pengolahan Pro-M memiliki kesesuaian dengan data MT.



Gambar 10. Distribusi hiposenter pada penampang MT (a). Penampang A-B memotong utara-selatan (b).

KESIMPULAN

Pengolahan data *microearthquake* terdiri dari beberapa tahapan mulai dari penentuan (*picking*) *arrival time*, koreksi stasiun, penentuan *origin time*, penentuan hiposenter prediksi, dan proses iterasi dengan algoritma Geiger untuk mendapatkan hiposenter.

Proses pengolahan data dengan program Pro-M dapat dilakukan dengan baik. Hiposenter hasil pengolahan data sintetik dengan program Pro-M berhimpit dengan lokasi data sintetik yang dibuat dengan RMS *error* rata-rata kurang dari 0.001. RMS *error* untuk pengolahan data riil menggunakan Pro-M bervariasi dari 0.002 hingga 0.3. Distribusi hiposenter pada Pro-M cenderung sesuai dengan hasil hiposenter Hypo71 dengan selisih jarak hiposenter berkisar 100-700 meter.

DAFTAR ACUAN

Ge, M. 1988. Optimization of Transducer array geometry for acoustic emission/microseismic source location. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering, 237 p.

Geiger, L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. Bull. St. Louis Univ., 8, 60-71.

Kayal, J.R. 2008. Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia. India: Springer.

Lee, W. H. K. and S. W. Stewart. 1981. Principles and applications of microearthquake networks, Adv. Geophys. Suppl. 2.

Miyazaki, S. 1995. Micro-earthquake Data Processing and Analysis System (MEPAS), a Software for Geothermal Applications. World Geothermal Congress, 3023-3028.

Munaziyi. 2013. Identifikasi Struktur (Zona Permeabel) Sistem Panasbumi Wayang Windu Dengan Menggunakan Metode Microearthquake. Skripsi, Universitas Indonesia, Departemen Fisika. Jakarta.

Onacha, S. Dan Kahn, Peter Malin, and Eylon Shalev. 2005. Resistivity and Microearthquake Imaging of Krafla Geothermal Field, NE Iceland. USA: Duke University.