

## Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode SED (Single Event Determination) di Area Geothermal Kamojang

Alamsyah Rizki Isroi\*, Alamta Singarimbun, dan Tommy Herdiansyah

### Abstrak

Penelitian mengenai Area Geothermal Kamojang telah banyak dilakukan, namun dari sekian penelitian tersebut hanya berfokus pada metode *gravity*. Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk monitoring Area Geothermal Kamojang adalah metode MEQ (Micro-Earthquake) dengan tujuan memperoleh sebaran hiposenter menggunakan metode penentuan hiposenter SED (Single Event Determination). Gempa mikro pada suatu area geothermal disebabkan oleh adanya zona lemah yang terbuka akibat injeksi air, zona tersebut akan semakin terbuka seiring pertambahan volume, laju, dan tekanan air reinjeksi, adanya kontak antara air dingin dengan batuan reservoir yang panas maupun *heat-source*, serta berkurangnya pori batuan akibat hilangnya fluida pengisi pori tersebut sebagai dampak aktivitas produksi. Karakteristik gempa mikro yaitu memiliki magnitudo  $\leq 3$  SR (Skala Richter) serta durasi gempanya yang tidak akan lebih dari satu menit. Metode penentuan hiposenter gempa yang dikembangkan oleh Geiger (1910) yaitu metode SED merupakan sebuah proses iterasi dengan optimasi Gauss-Newton untuk menentukan lokasi sumber gempa bumi. Metode tersebut merupakan pemodelan ke depan dengan tujuan meminimalkan nilai *travel time residual* antara *arrival time* yang teramati dengan *arrival time* yang diprediksi atau hasil pemodelan. Dari pengolahan data rekaman gempa selama bulan April – Mei 2014, diperoleh 56 events/kejadian gempa mikro dengan rincian terdapat 39 events yang memiliki magnitudo gempa 0,1 SR, 14 events dengan magnitudo 0,2 SR, 2 events 0,3 SR, serta 1 events magnitudo 0,4 SR. Mayoritas hiposenter gempa yang diperoleh dari pengolahan data ternyata berada di luar Area Geothermal Kamojang.

**Kata-kata kunci:** episenter, gempa mikro, geothermal, hiposenter, Kamojang

### Pendahuluan

Penelitian tentang Area Geothermal Kamojang dalam rangka pengembangan dan menjaga keberlanjutan proses produksi uap kering telah dilakukan oleh [1], [2], [3]. Namun metode geofisika yang digunakan pada penelitian tersebut hanya berfokus pada metode *gravity*. Sementara menurut [4], [5], dan [6] salah satu metode yang juga akurat dalam proses monitoring suatu area geothermal atau panas bumi adalah metode MEQ (*micro-earthquake*). Metode tersebut telah diterapkan dalam penelitian [7] dengan data rekaman gempa Maret 2004 – Februari 2005. Hiposenter gempa mikro yang diperoleh dari penelitian tersebut akan sangat penting dalam penentuan arah pengembangan Area Geothermal Kamojang [8].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan hiposenter gempa mikro di Area Geothermal Kamojang dari rekaman data MEQ April – Mei 2014. Metode penentuan hiposenter suatu kejadian gempa telah dikembangkan oleh Geiger pada tahun 1910 yang disebut sebagai metode SED (*Single Event Determination*) [9]. Metode tersebut digunakan dalam penelitian ini untuk memperoleh sebaran hiposenter dan episenter gempa mikro yang terjadi selama bulan Mei 2014 di Area Geothermal Kamojang.

### Teori

Gelombang seismik merupakan rambatan energi yang diakibatkan karena adanya gangguan di dalam kerak bumi, misalnya adanya patahan atau terjadi suatu ledakan [10]. Secara umum gelombang seismik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

Berdasarkan propagasinya, gelombang badan juga dibedakan menjadi dua jenis yaitu gelombang P dan gelombang S. Sementara itu, metode penentuan hiposenter gempa yang dikembangkan oleh Geiger (1910) yaitu metode SED merupakan sebuah proses iterasi dengan optimasi Gauss-Newton untuk menentukan lokasi sumber gempa bumi.

Pemodelan ke depan dilakukan, dengan tujuan meminimasi nilai *travel time residual* antara *arrival time* yang teramati dengan *arrival time* yang diprediksi atau hasil pemodelan.

$$r_j = t_j - t_{pred,j} \quad (1)$$

Dengan  $r_j$  adalah *residual time* antara *arrival time* terekam dengan *arrival time* prediksi,  $t_j$  adalah *arrival time* pada indeks ke- $j$ ,  $t_{pred,j}$  adalah *arrival time* prediksi pada indeks ke- $j$ . Nilai *arrival time* prediksi diberikan oleh persamaan berikut:

$$t_{pred,j} = T - TT(x_j, y_j, 0, X, Y, Z) \quad (2)$$

TT merupakan *travel time* prediksi dari sumber gempa hingga terekam di stasiun pengamatan. Perkiraan *arrival time* prediksi memenuhi persamaan

$$T + \Delta T + TT(x_j, y_j, 0, X, Y, Z) + \frac{\partial TT_j}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial TT_j}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial TT_j}{\partial Z} \Delta Z \quad (3)$$

Kemudian perubahan tersebut dibuat agar menjadi alasan terjadinya residual,

$$res_j = \Delta T + \frac{\partial TT_j}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial TT_j}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial TT_j}{\partial Z} \Delta Z \quad (4)$$

sekarang terlihat bahwa perubahan dari koordinat awal menunjukkan hubungan yang linear. Salah satu cara untuk mendekati masalah ini adalah untuk memilih perubahan sehingga meminimalkan ekspresi berikut

$$R = \sum res_j^2 \quad (5)$$

kondisi untuk memaksa nilai di atas menjadi ekstrem minimum adalah

$$\frac{\partial R}{\partial \Delta T} = 0; \frac{\partial R}{\partial \Delta X} = 0; \frac{\partial R}{\partial \Delta Y} = 0; \frac{\partial R}{\partial \Delta Z} = 0 \quad (6)$$

Kemudian kondisi-kondisi tersebut dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \sum_j TT_x TT_x & \sum_j TT_y TT_x & \sum_j TT_z TT_x & \sum_j TT_x \\ \sum_j TT_x TT_y & \sum_j TT_y TT_y & \sum_j TT_z TT_y & \sum_j TT_y \\ \sum_j TT_x TT_z & \sum_j TT_y TT_z & \sum_j TT_z TT_z & \sum_j TT_z \\ \sum_j TT_x & \sum_j TT_y & \sum_j TT_z & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_j res_j TT_x \\ \sum_j res_j TT_y \\ \sum_j res_j TT_z \\ \sum_j res_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

dengan notasi  $TT_x = \frac{\partial TT_j}{\partial X}$ , serta nilai  $\frac{\partial TT_j}{\partial T} = 1$ . Sehingga diperoleh perubahan koordinat prediksi sumber gempa yang tidak lain adalah solusi persamaan linear tadi. Untuk perkiraan koordinat ke - j+1 diberikan oleh persamaan berikut:

$$X_{j+1} = X_j + \Delta X \quad (8)$$

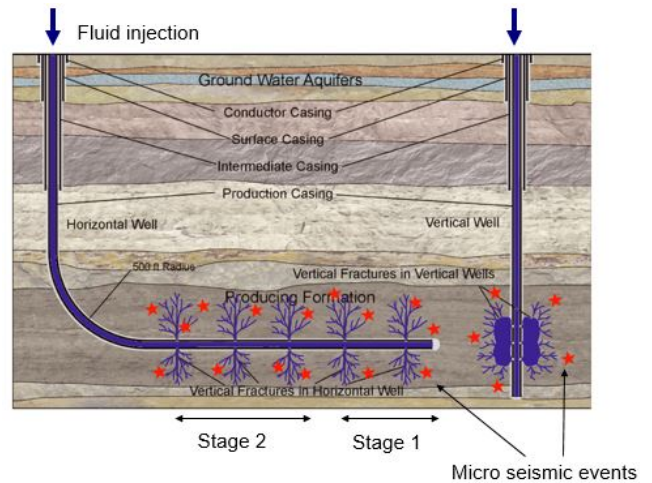
$$Y_{j+1} = Y_j + \Delta Y \quad (9)$$

$$Z_{j+1} = Z_j + \Delta Z \quad (10)$$

$$T_{j+1} = T_j + \Delta T \quad (11)$$

Dalam penelitian ini, kajian gempa pada suatu sistem geothermal dalam rangka proses monitoring lebih difokuskan pada gempa mikro. Investigasi mengenai gempa mikro (magnitudo  $\leq 3$  Skala Richter) di zona lempeng tektonik aktif serta daerah vulkanik telah menunjukkan sistem konveksi hidrotermal dengan karakterisasi adanya aktivitas gempa mikro yang tinggi [6]. Simulasi hidrolik pernah dilakukan oleh [12] yang kemudian membenarkan adanya kaitan hiposenter gempa mikro dengan munculnya

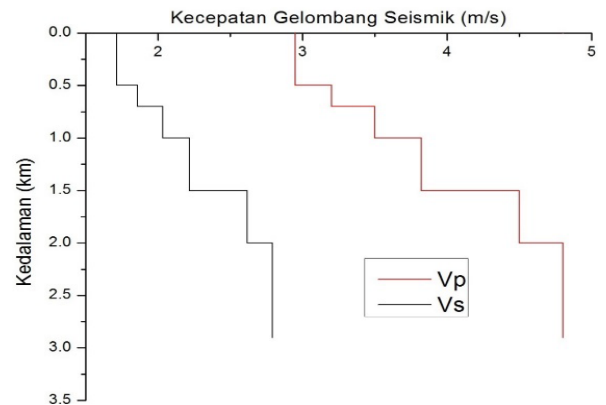
zona rekahan akibat fluida reinjeksi serta aktivitas produksi.



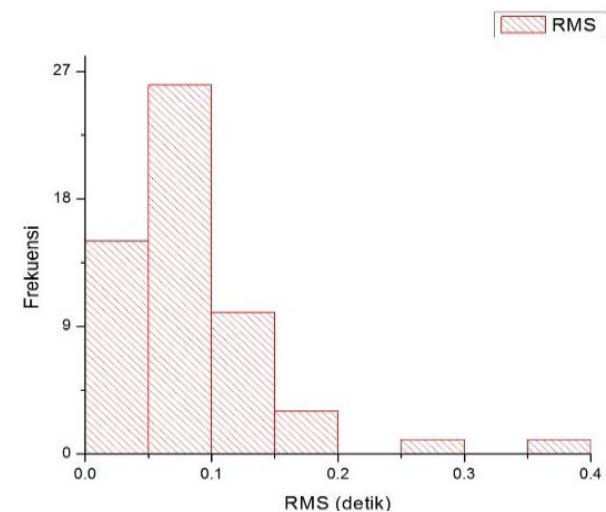
Gambar 1. Contoh penyebab gempa mikro [12].

### Hasil dan diskusi

Model kecepatan gelombang seismik yang digunakan pada penelitian ini adalah model 1 dimensi dengan jumlah lapisan sebanyak 6 lapis sebagaimana ditunjukkan gambar 2 berikut ini.

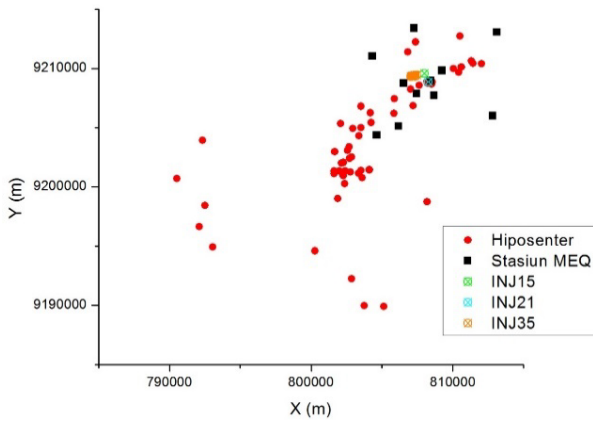


Gambar 2. Model kecepatan gelombang seismik.

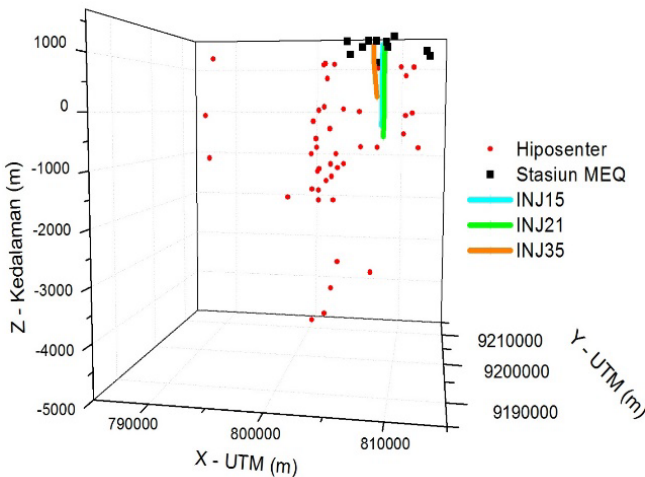


Gambar 3. RMS hiposenter gempa mikro hasil pengolahan data.

Kemudian dari pengolahan data yang dilakukan berdasarkan rekaman kegempaan di Area Geothermal Kamojang selama bulan April – Mei 2014, diperoleh 56 *events*/kejadian gempa mikro. Terdapat 39 *events* yang memiliki magnitudo gempa 0,1 SR (Skala Richter), 14 *events* dengan magnitudo 0,2 SR, 2 *events* 0,3 SR, serta 1 *event* magnitudo 0,4 SR. Dengan RMS residual time error terlihat pada gambar 3. Mayoritas nilai error kurang dari 0,2 detik yang artinya hiposenter gempa yang diperoleh terbilang cukup akurat. Hal ini sesuai dengan beberapa penelitian yang pernah dilakukan di beberapa lapangan panas bumi lain [6].



Gambar 4. Episenter gempa mikro, koordinat X dan Y dalam UTM.



Gambar 5. Hiposenter gempa mikro – penampang SW (*southwest*) – NE (*northeast*).

Pada gambar 4 dapat dilihat bagaimana sebaran episenter gempa mikro yang diperoleh ternyata hampir 50% justru terletak di luar Area Geothermal Kamojang, yang dibatasi oleh stasiun-stasiun MEQ yang ditunjukkan oleh titik titik berwarna hitam pada gambar 4 dan 5. Hal tersebut sangat dimungkinkan dapat terjadi karena Area Geothermal Kamojang yang berada di rantai vulkanik Rakutak-Guntur, sehingga aktivitas kegempaan di sekitarnya cukup tinggi.

Sehingga selanjutnya yang terekam oleh stasiun perekam gempa atau stasiun MEQ justru aktivitas kegempaan yang ada di luar cakupan Area Geothermal Kamojang pada kasus ini.

Lebih lanjut lagi, pada gambar 5 yaitu jika ditinjau pada bawah permukaan dengan penampang SW – NE ataupun lokasi hiposenter gempa yang ternyata juga mendukung pernyataan paragraf di atas, gempa mikro selama April-Mei 2014 yang terekam oleh stasiun MEQ Kamojang hanya sedikit yang terkait dengan aktivitas reinjeksi air dan produksi uap panas. Hiposenter-hiposenter gempa mikro tersebut dapat berasal dari intrusi magmatik, mengingat kedalaman hiposenter tersebut yang cukup dalam. Selain itu keberadaan Gunung Papandayan di bagian barat daya (SW) akan menambah intensitas kegempaan yang terekam sebagaimana tingkat keaktifan gunung tersebut yang juga masih tinggi. Sementara itu, hiposenter yang benar – benar diakibatkan oleh adanya kemunculan zona rekahan akibat fluida reinjeksi serta aktivitas produksi seperti yang ditunjukkan pada gambar 1, dari hasil penelitian yang dilakukan yaitu gambar 4 dan 5, hanya sebagian kecil hiposenter yang sesuai dengan teori tersebut. Tepatnya beberapa hiposenter yang terlihat jelas pada gambar 5 terletak dekat dengan ujung injeksi sumur INJ21 (warna hijau).

## Kesimpulan

Metode SED dapat digunakan untuk menentukan hiposenter gempa mikro berdasarkan rekaman kegempaan di stasiun MEQ yang berada di Area Geothermal Kamojang selama bulan April – Mei 2014. Dari pengolahan data yang dilakukan, diperoleh 56 *events*/kejadian gempa mikro. Dengan rincian 39 *events* yang memiliki magnitudo gempa 0,1 SR (Skala Richter), 14 *events* dengan magnitudo 0,2 SR, 2 *events* 0,3 SR, serta 1 *event* magnitudo 0,4 SR. Meskipun demikian, perlu digunakan metode yang lebih baik untuk mengoreksi adanya kesalahan pembacaan *arrival time* yang pada metode SED ini diasumsikan linear sebagaimana dinyatakan pada persamaan (4), hal ini juga terbukti dengan masih adanya nilai RMS residual error yang nilainya cukup besar yaitu lebih dari 0,2 detik.

## Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT. Pertamina Geothermal Energy Area Kamojang atas izin yang diberikan sehingga dapat melaksanakan internship guna mendukung studi penulis serta keberlangsungan penelitian ini, terutama untuk Bapak Tommy Herdiansyah, M. Si. selaku ahli geosains dan

juga pembimbing dalam kegiatan internship tersebut.

## Referensi

- [1] Sofyan, Y., Daud, Y., Kamah, Y., Ehara, S., "Microgravity method to model mass balance in the Kamojang Geothermal Field", *Current Applied Physics* 10 (2010) S108–S112, 2009, Department of Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University, Japan.
- [2] Sofyan, Y., Daud, Y., Kamah, Y., Ehara, S., "Sustainable Geothermal Utilization Deduced from Mass Balance Estimation -A Case Study of Kamojang Geothermal Field, Indonesia-", *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010*
- [3] Sofyan, Y., Daud, Y., Nishijima, J., Fujimitsu, Y., Kamah, Y., Yani, A., Fukuda, Y., Taniguchi, M., "The first repeated absolute gravity measurement for geothermal monitoring in The Kamojang Geothermal Field, Indonesia", *Geothermics* 53 (2015) 114–124, 2014.
- [4] Foulger, G. R., "Geothermal exploration and reservoir monitoring using earthquakes and the passive seismic method", *Geothermics*, 11, 259-268, 1982.
- [5] Ross, A., G. R. Foulger, and B. R. Julian, "Source processes of industrially-induced earthquakes at The Geysers geothermal area, California", *Geophysics*, 64, 1877-1889. 1999.
- [6] Gupta, H., Roy, S., "Geothermal Energy: An Alternative Resource For The 21st Century", Oxford, Elsevier, 2007.
- [7] Hilyah, A., "Studi Gempa Mikro untuk mendeteksi Rekanan di area Panas bumi Kamojang Kabupaten Garut", Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), *JURNAL FISIKA DAN APLIKASINYA VOLUME 6, NOMOR 2 JUNI, 2010*.
- [8] Suryadarma, Dwikorianto, T., Agus A. Zuhrob, A. A., Yani, A., "Sustainable development of the Kamojang geothermal field", *Geothermics* 39 (2010) 391–399, 2010
- [9] Geiger, L., "Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen", *Mathematisch-Physikalische Klasse*, hal. 331-349. 1910.
- [10] Afnimar, "Seismologi", Bandung: Penerbit ITB, 2009.
- [11] Pramatadie, A. M., "Relokasi Hiposenter Gempa dengan Menggunakan Data Meramex dan Metode Double Difference",

- Tugas Akhir Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung, 2011.
- [12] D. Gei, L. Eisner, P. Suhadolc, "Passive seismic analysis for reservoir monitoring", *Capo Caccia, Sardinia, Italy*, 2010.

Alamsyah Rizki Isroi\*  
Earth Science & Complex Systems Research Division  
Institut Teknologi Bandung  
rizkiisroi@live.com

Alamta Singarimbun  
Earth Science & Complex Systems Research Division  
Institut Teknologi Bandung  
alamta@fi.itb.ac.id

Tommy Herdiansyah  
PT. Pertamina Geothermal Energy  
tommy.hendriansyah@pertamina.com

\*Corresponding author