



## Penentuan Kedalaman dan Sudut Kemiringan Sesar Grindulu di Pacitan Menggunakan Metode *Crow Search Algorithm* (CSA) pada Data *Self-Potential* (SP)

Reni Agustin<sup>1</sup>, Sungkono<sup>1</sup>, Arif Haryono<sup>2,\*</sup>)

<sup>1</sup>) *Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jl. Keputih, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111*

<sup>2</sup>) *Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Mulawarman Jl. Barong Tongkok, Kampus Gunung Kelua, Samarinda, 75123*

\*E-mail korespondensi: [arif.haryono@fmipa.unmul.ac.id](mailto:arif.haryono@fmipa.unmul.ac.id)

---

### Abstract

Self-Potential (SP) is a geophysical survey method that is relatively easy and inexpensive. Interpretation of SP data can be used for various purposes such as the detection of landslide-prone areas, exploration of various types of minerals, and identification of the parameters of a fault or crack. In this study, SP data acquisition was carried out in Tambakrejo Village, Pacitan District with a total of 102 measurement data which aims to determine the depth and dip of the Grindulu Fault. SP data acquired in the field needs to be corrected for reference, namely corrections caused by a displacement of the starting point of measurement. This data is then filtered to increase the signal-to-noise ratio (SNR) and sharpen the resulting anomalies. This filtering process is carried out using the ICEEMD (Improved Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition) method which is a development of the EMD method. Furthermore, the SP data inversion process to obtain model parameters is carried out by utilizing the CSA (Crow Search Algorithm) method. Based on the anomaly model generated from the SP data inversion process, it can be concluded that the Grindulu Fault was identified at a distance of 803.8 meters from the starting point of measurement with depths ranging from 11.06 to 102.74 meters. Furthermore, based on distance, depth, and anomaly shape data, the dip value can be calculated. The calculation results show that the dip of the Grindulu Fault in the study area is 75.58°. Identification of the Grindulu Fault in the form of depth and dip is very important in efforts to model the fault comprehensively.

**Kata Kunci:** CSA Method; Dip; Grindulu Fault; Self-Potential Data

---

### PENDAHULUAN

Indonesia adalah salah satu negara dengan ancaman bencana alam yang relatif besar, hal ini terkait dengan letak Indonesia yang merupakan pertemuan antara beberapa lempeng tektonik. Aktivitas lempeng tektonik tersebut menyebabkan terbentuknya sesar-sesar lokal terutama di Pulau Jawa, Sumatera, dan Sulawesi. Salah satu kabupaten yang mempunyai banyak sesar lokal adalah Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur. Meskipun demikian, sesar-sesar lokal di Kabupaten Pacitan masih belum diperhitungkan dalam pembuatan peta sumber dan bahaya gempa bumi di Indonesia yang disusun oleh tim Pusat Studi Gempa Nasional [1].

Kabupaten Pacitan dilewati oleh sebelas sesar lokal yang telah teridentifikasi yaitu Sesar Grindulu, Karangrejo, Kayuwayang, Pucunglengan, Tegalombo, Punung, Buyutan, Pakis, Melokolegi, Dayakan, dan Pucak [2]. Di antara sebelas sesar lokal yang ada di Kabupaten Pacitan, Sesar Grindulu adalah sesar yang patut diwaspadai. Hal ini terkait dengan posisi Sesar Grindulu yang membelah Kabupaten Pacitan melewati lima kecamatan dari total 12 kecamatan yang ada di Kabupaten Pacitan. Salah satu dari lima kecamatan tersebut adalah Kecamatan Pacitan yang merupakan kecamatan dengan penduduk terpadat di Kabupaten Pacitan. Berdasarkan data hasil sensus penduduk Badan Pusat Statistik tahun 2020 [3], kepadatan penduduk Kecamatan Pacitan adalah 1.014 jiwa/km<sup>2</sup>, sedangkan jumlah penduduknya tercatat sebanyak 78.161 jiwa atau sebesar 13,34% dari total penduduk Kabupaten Pacitan (586.110 jiwa). Selain Kecamatan Pacitan, Sesar Grindulu juga melewati Kecamatan Arjosari dan Kecamatan Tegalombo, dimana kedua kecamatan ini merupakan jalur utama yang menghubungkan antara Kabupaten Pacitan dengan Kabupaten Ponorogo.

Berdasarkan kondisi tersebut di atas, perlu dilakukan langkah-langkah mitigasi bencana, salah satunya adalah identifikasi karakteristik Sesar Grindulu yang diduga sebagai penyebab terjadinya gempa bumi. Dalam penelitian ini, parameter yang dicari dalam proses identifikasi Sesar Grindulu adalah kedalaman sesar dan sudut kemiringan bidang sesar (*dip*). Tipe Sesar Grindulu adalah sesar geser mengiri (*sinistral*) dengan rezim tegasannya dikategorikan bertipe *pure strike-slip* [4].

Berdasarkan data dari Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) setidaknya terdapat 11 gempa bumi yang terjadi di Kabupaten Pacitan dengan magnitude di atas 3 ( $M > 3$ ) dan lokasi episenter ada di daratan. Lokasi episenter yang berada di daratan menunjukkan bahwa gempa tersebut dipicu oleh aktivitas sesar-sesar lokal yang ada di Pacitan, terutama Sesar Grindulu. Data lengkap dari 11 gempa bumi tersebut diperlihatkan pada Tabel 1, dengan rentang waktu kejadian gempa adalah dari tahun 2003 hingga 2020.

Tabel 1. Data gempa bumi yang terjadi di Kabupaten Pacitan berdasarkan data dari PUSGEN dan BMKG dalam rentang waktu tahun 2003 hingga 2020.

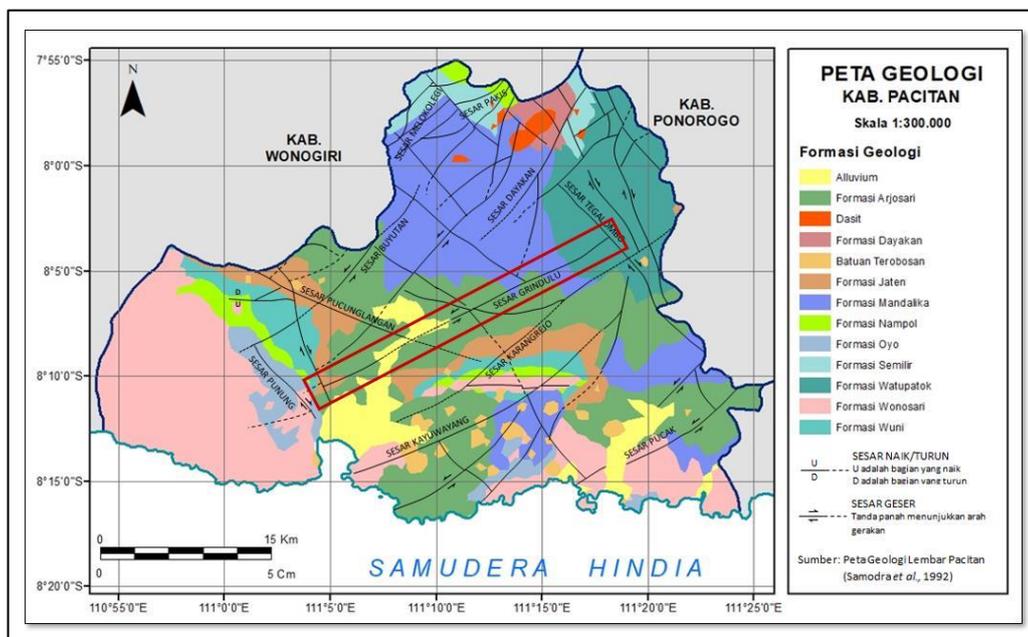
No.	Tanggal	Episenter	Magnitude (SR)	Kedalaman (Km)
1.	23-08-2020	111,31 E; 7,98 S	4,7	140
2.	02-06-2015	111,31 E; 8,15 S	4,1	131
3.	25-12-2014	111,25 E; 8,02 S	3,4	10
4.	28-09-2014	111,14 E; 8,12 S	3,8	10
5.	07-05-2013	111,28 E; 7,99 S	4,7	154
6.	29-12-2011	111,02 E; 8,19 S	3,1	83
7.	13-06-2011	110,81 E; 8,16 S	5,0	124
8.	28-11-2008	111,46 E; 8,17 S	5,2	81
9.	24-11-2007	111,37 E; 8,02 S	5,1	75
10.	07-11-2003	111,11 E; 7,93 S	5,2	150
11.	27-07-2003	111,13 E; 8,14 S	3,7	33

## TINJAUAN PUSTAKA

### Kondisi Geologi

Lokasi Pacitan termasuk dalam Zona Pegunungan Selatan bagian timur yang didominasi oleh karst dan batuan vulkanik. Zona ini dibagi menjadi tiga sub-zona, yaitu Baturagung,

Wonosari, dan Gunung Sewu. Zona Pegunungan Selatan terbentuk oleh aktivitas subduksi yang disebabkan adanya interaksi antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia. Interaksi ini pula yang menyebabkan terbentuknya beberapa sesar yang terdapat di daerah Pacitan. Kondisi geologi di daerah Pacitan sebagian besar didominasi oleh batuan vulkanik seperti di Formasi Watupatok, Mandalika, Dayakan, Wuni, Jaten, Semilir, dan Nampol. Sedangkan Formasi Wonosari didominasi oleh karst, dan Formasi Arjosari serta Oyo tersusun atas kombinasi antara batuan vulkanik dan karst [5].



Gambar 1. Peta Geologi Regional Kabupaten Pacitan

Formasi batuan tertua di Pacitan adalah Formasi Besole yang tersusun oleh batuan ekstrusif yang terdiri dari tonalit, dasit, andesit, dan tuf. Di atas Formasi Besole terendapkan secara tidak selaras Formasi Jaten yang tersusun dari batupasir kuarsa, batulanau, batulempung, dan batugamping. Pada beberapa tempat antara batulanau dan batulempung tersisipkan konglomerat, serta sering ditemukan fosil kayu. Formasi ini terendapkan dalam lingkungan fluvialik/paralik dan berumur Miosen Tengah. Kondisi geologi regional Kabupaten Pacitan secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 1, yang sesuai kebutuhan, telah disederhanakan dan digambar ulang tanpa merusak informasi yang ada pada peta aslinya [2]. Berdasarkan Gambar 1 tersebut terlihat bahwa posisi Sesar Grindulu (tanda kotak warna merah) seakan membelah Kabupaten Pacitan menjadi dua dengan arah timur laut – barat daya.

### Metode ICEEMD

Metode *Improved Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition* (ICEEMD) merupakan pengembangan dari metode CEEMD (*Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition*) yang berbasis pada metode EMD (*Empirical Mode Decomposition*). Metode EMD sendiri merupakan metode yang digunakan untuk memfilter data dengan menganalisis sinyal alami yang non-linier dan non-stasioner dengan cara mempartisi data menjadi beberapa mode atau IMF (*intrinsic mode function*). Namun, metode yang dikenalkan oleh Huang et al. [6] ini memiliki kelemahan, yaitu masalah “*mode-mixing*” (adanya osilasi amplitudo yang sangat berbeda dalam sebuah mode atau kehadiran osilasi yang sangat mirip dalam mode yang berbeda) [7], [8]. Masalah *mode-mixing* ini akan mengurangi kemampuan metode EMD dalam mereduksi noise [9]. Untuk mengatasi masalah pada metode EMD, Wu dan Huang [10]

mengembangkan metode EEMD (*Ensemble Empirical Mode Decomposition*) dengan menambahkan white noise, yang berfungsi untuk memaksa ensemble menyediakan semua solusi dalam proses pengolahan. Meskipun metode EEMD secara efektif dapat menyelesaikan masalah mode-mixing, akan tetapi muncul masalah baru; seperti misalnya, sinyal yang direkonstruksi masih mengandung noise sisa (*residual noise*) yang tidak bisa dihilangkan dan realisasi sinyal plus noise yang berbeda dapat menghasilkan jumlah mode yang berbeda [8], [9].

Selanjutnya, Torres *et al.* [8] mengajukan metode CEEMD (*Complete EEMD*) untuk menyelesaikan masalah yang timbul pada metode EEMD, dan untuk meningkatkan performa CEEMD, Colominas *et al.* [7] mengembangkan metode ICEEMD (*Improved CEEMD*). Menurut Colominas *et al.* [7] dan Wang *et al.* [11], keunggulan filter ICEEMD dibandingkan dengan metode sebelumnya adalah kemampuan dalam menghilangkan noise dan mengembalikan karakteristik sinyal yang lebih baik. Selain itu, jumlah iterasi yang diperlukan selama proses perhitungan lebih sedikit dibanding metode EEMD, sehingga dapat menghemat waktu dan biaya komputasi.

### Metode CSA

Metode CSA (*Crow Search Algorithm*) adalah metode metaheuristik yang meniru perilaku cerdas sekelompok burung gagak (*crow*). Metode ini dapat digolongkan ke dalam *Global Optimization* (optimum global) yang secara umum masuk dalam metode Monte-Carlo (acak). Beberapa hasil publikasi menunjukkan bahwa metode ini mempunyai kapasitas untuk memecahkan beberapa masalah optimasi rekayasa yang kompleks. Terlepas dari hasil yang menarik, strategi pencariannya akan mengalami kesulitan besar ketika menghadapi formulasi multi-modal yang tinggi [12]. Algoritma ini didasarkan pada perilaku dan karakteristik burung gagak yaitu: 1) Umumnya, burung gagak hidup sebagai sebuah kelompok; 2) burung gagak memiliki ingatan terhadap posisi sarang-sarang mereka; 3) burung gagak saling mengikuti satu sama lain secara sembunyi-sembunyi untuk mencuri sarangnya; dan 4) burung gagak melindungi sarangnya dari penyusup lain dengan beberapa kemungkinan. Setelah menemukan posisi yang baru, langkah selanjutnya adalah mengecek kelayakannya. Jika layak, maka gagak akan menempati posisi baru tersebut. Sebaliknya, jika tidak layak, maka gagak akan mencari posisi secara acak di dalam model [13].

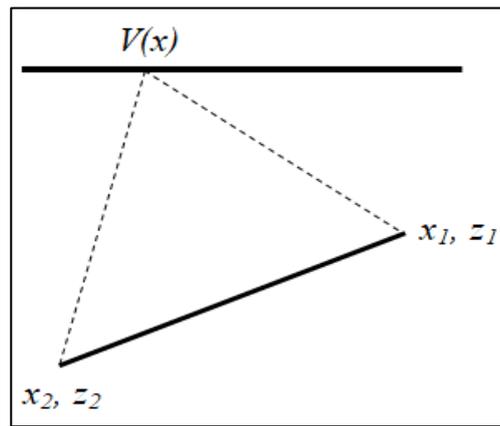
### Model Anomali SP

Pendekatan dalam memodelkan anomali SP dapat diklasifikasikan sebagai bodi anomali ideal (horizontal, silinder vertikal, atau lempeng miring) dan bodi non-ideal yang menggunakan pendekatan elemen hingga. Untuk model geologi berupa rekahan atau patahan, anomali SP dapat dianggap sebagai lempeng miring (*inclined sheet*) dua dimensi (2D) seperti diperlihatkan pada Gambar 2 [14].

Persamaan umum untuk menghitung besarnya tegangan listrik di sembarang titik-x yang disebabkan oleh anomali SP berbentuk lempeng miring 2D dinyatakan pada Pers. (1) [14]. Pers. (1) tersebut digunakan untuk menghindari adanya ambiguitas yang dibentuk oleh proses inversi data SP berupa anomali dalam bentuk lempeng miring.

$$V(x) = k \ln \left[ \frac{(x - x_1)^2 + z_1^2}{(x - x_2)^2 + z_2^2} \right] \quad (1)$$

dengan  $k = I\rho / 2\pi$  adalah konstanta polarisasi, sedangkan  $(x_1, z_1)$  dan  $(x_2, z_2)$  berturut-turut adalah koordinat tepi atas dan tepi bawah lempeng.



Gambar 2. Deskripsi parameter model untuk anomali berbentuk lempeng miring 2D [14]

Untuk anomali SP dengan jumlah lempeng yang banyak (*multiple sheet-type*), potensial listrik didapatkan dengan penjumlahan aljabar dari masing-masing target individu karena potensial listrik adalah besaran skalar. Besarnya potensial listrik dapat dihitung berdasarkan Pers. (2) [15].

$$V(x) = \sum_{i=1}^M V_i(x) \quad (2)$$

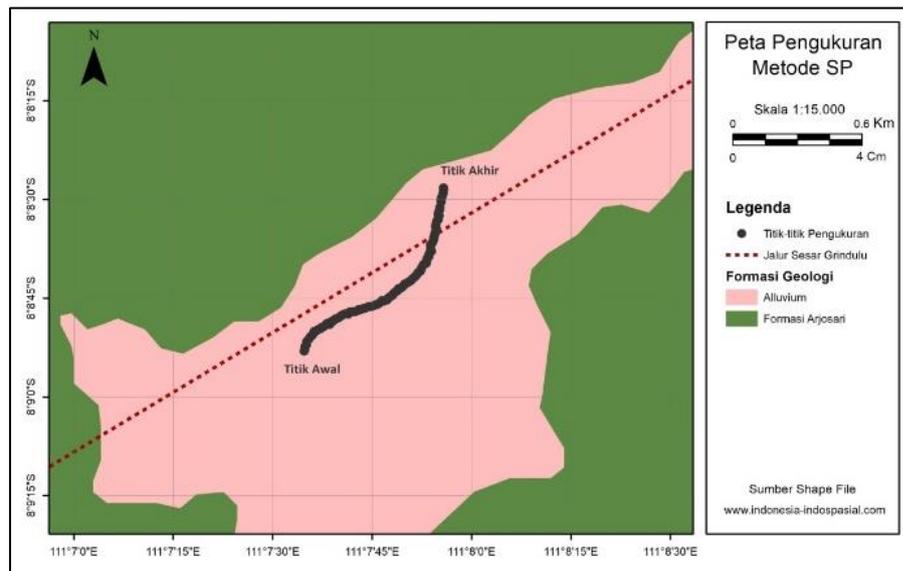
dengan  $V_i(x)$  adalah beda potensial pada lokasi  $x$  untuk lempeng ke- $i$ , dan  $M$  adalah jumlah lempeng.

## METODE PENELITIAN

Proses akuisisi data SP (*Self-Potential*) menggunakan metode *fixed base*, dengan lintasan sepanjang 1020 m dan spasi antar porous pot adalah 10 m. Secara administratif, lokasi penelitian berada di Desa Tambakrejo, Kecamatan Pacitan, dimana formasi batumannya adalah alluvium. Formasi alluvium pada umumnya terbentuk oleh endapan sungai, pantai, dan rawa, serta tersusun oleh material lepas berukuran lempung, pasir, kerikil, dan kerakal [16] Lokasi penelitian dan titik-titik pengukuran diperlihatkan pada Gambar 3.

Pengolahan data SP dilakukan dalam tiga langkah utama yaitu, penentuan nilai koreksi referensi, filtering menggunakan metode ICEEMD, dan proses inversi menggunakan metode CSA. Koreksi referensi adalah koreksi yang diakibatkan oleh adanya perpindahan titik awal pengukuran, sedangkan proses filtering dilakukan untuk mereduksi adanya noise pada data pengukuran.

Selanjutnya, data yang telah terfilter dilakukan proses inversi untuk menghasilkan parameter model dari anomali bawah permukaan. Pada proses inversi ini, model SP dianggap sebagai lempengan miring (*inclined sheet*) yang memiliki lima parameter untuk tiap sumber anomalnya yaitu:  $k, x_1, z_1, x_2, z_2$ .



Gambar 3. Lokasi penelitian dan titik-titik pengukuran

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Koreksi Referensi

Sebelum dilakukan proses pengolahan data berupa filtering dan inversi, data mentah yang dihasilkan dari pengukuran di lapangan perlu dilakukan koreksi referensi, yaitu koreksi yang diakibatkan oleh adanya perpindahan titik awal pengukuran. Data hasil perhitungan koreksi referensi pada penelitian ini ditampilkan dalam bentuk kurva, dan diperlihatkan pada Gambar 4. Data inilah yang selanjutnya dilakukan proses filtering untuk meningkatkan rasio sinyal ke *noise* (SNR) dan mempertajam anomali yang dihasilkan.

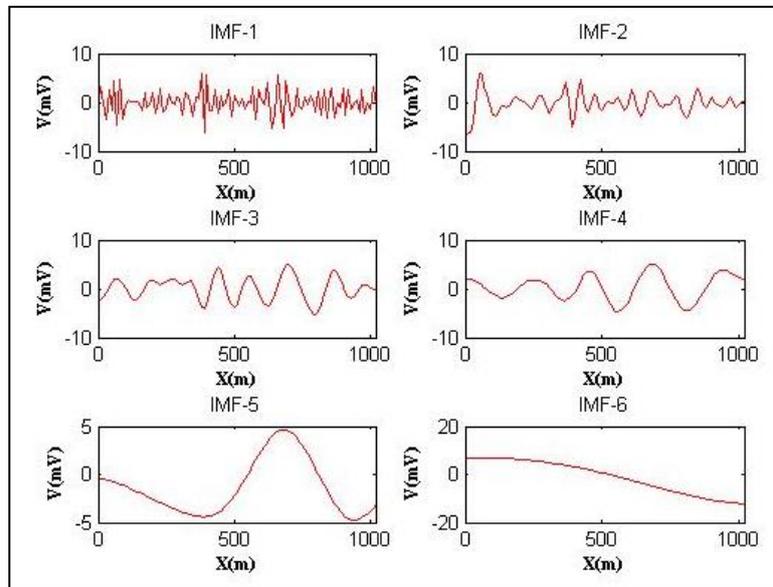


Gambar 4. Kurva data hasil koreksi referensi

### Hasil Filter ICEEMD

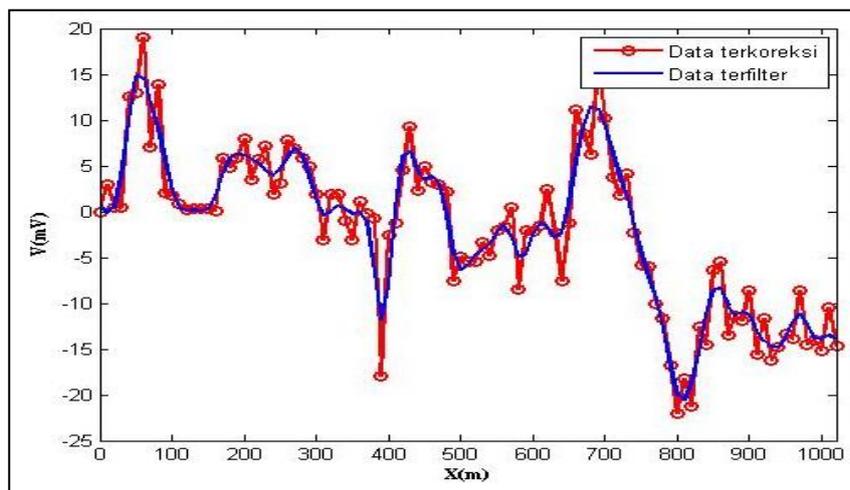
Data hasil koreksi referensi selanjutnya difilter menggunakan metode ICEEMD yang dikembangkan oleh Colominas *et al.* [7], dimana hasil dekomposisinya berupa enam buah mode yaitu IMF1 hingga IMF6 seperti terlihat pada Gambar 5. Mode IMF yang kecil mengandung

panjang gelombang yang rendah dan berlaku sebaliknya. Langkah selanjutnya adalah memilih sejumlah IMF sebagai data terfilter yang terbaik. Dalam proses pemilihan ini, hanya IMF1 yang diabaikan dengan beberapa pertimbangan, antara lain [17]: 1) IMF1 memiliki panjang gelombang pendek yang disebabkan oleh heterogenitas tanah, 2) Sesar Grindulu dibentuk oleh reaktivasi patahan di batuan dasar, sehingga sesar ini diperlihatkan oleh data SP dengan panjang gelombang yang panjang, 3) anomali regional dari data SP pada umumnya memiliki nilai konstan atau linier [18], [19].



Gambar 5. Hasil dekomposisi data SP menggunakan filter ICEEMD

Perbandingan antara data hasil koreksi referensi dengan data terfilter diperlihatkan pada Gambar 6, dimana kurva data terfilter terlihat mampu menghilangkan titik-titik data yang diduga merupakan *noise*. Data terfilter inilah yang selanjutnya dimodelkan melalui pemodelan inversi menggunakan metode CSA.

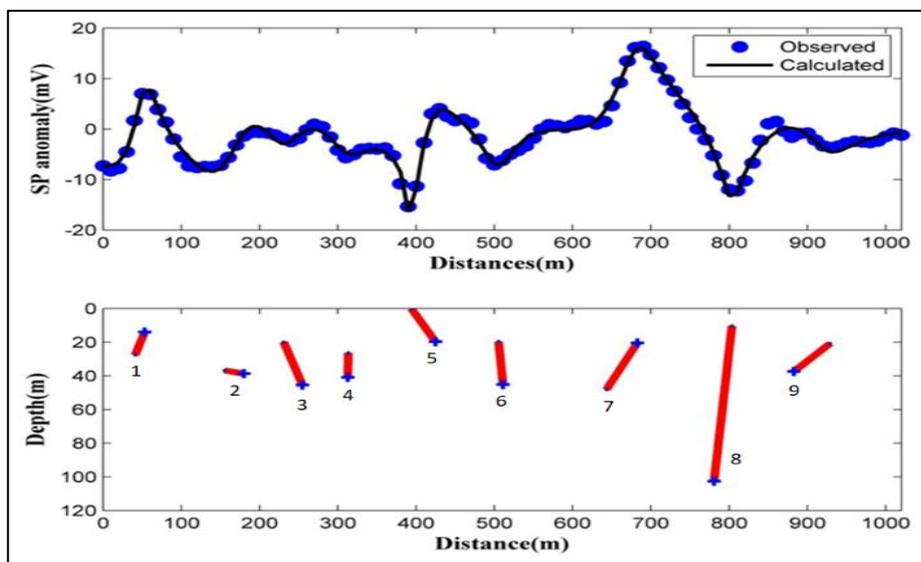


Gambar 6. Perbandingan data terkoreksi dan data terfilter

### Analisis Model Hasil Metode CSA

Proses inversi data SP menggunakan metode CSA membutuhkan data masukan berupa data yang telah terfilter sebelumnya dan data inialisasi awal berupa nilai  $k$ ,  $x_1$ ,  $z_1$ ,  $x_2$ ,  $z_2$ . Hasil dari proses inversi tersebut dapat dilihat pada Gambar 7, dimana pada panel bagian atas

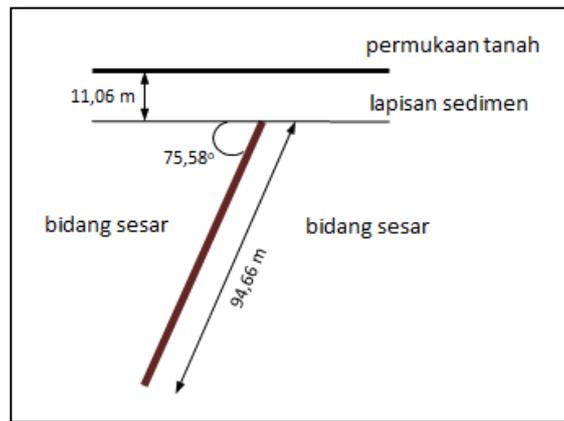
memperlihatkan bahwa data yang terfilter (bulatan berwarna biru) dapat ter-*fitting* sempurna dengan data hasil perhitungan (garis berwarna hitam). Hasil *fitting* yang sempurna antara data terfilter dengan data perhitungan ini menunjukkan bahwa pemodelan inversi yang dilakukan telah sesuai dengan yang diharapkan, dimana model anomali yang dihasilkan mendekati dengan kondisi yang sebenarnya. Sedangkan pada panel bagian bawah menunjukkan bentuk dan jumlah model anomali bawah permukaan yang terdeteksi berdasarkan pemodelan inversi metode CSA, dimana bentuk dan jumlah model anomali tergantung pada data inisialisasi awal.



**Gambar 7.** Hasil inversi data SP menggunakan metode CSA dengan model *multi inclined sheet*

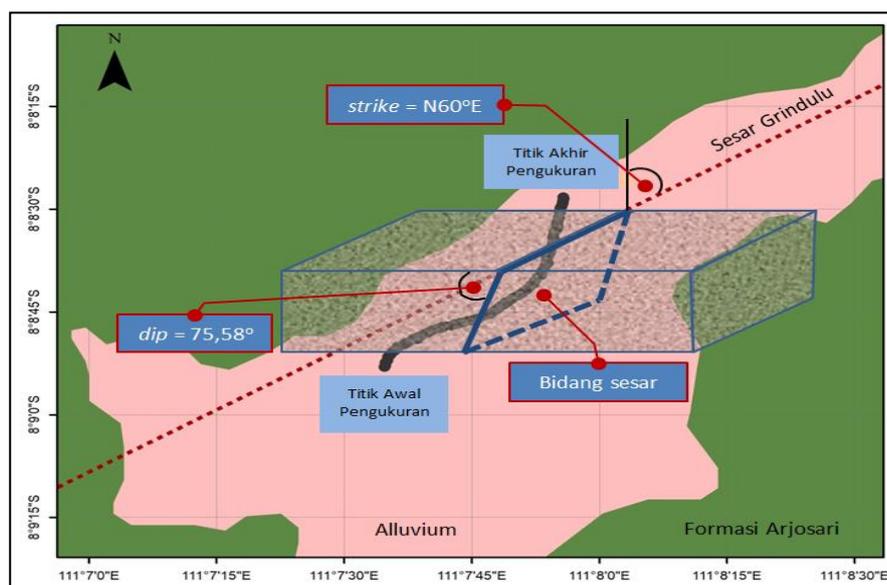
Proses inversi menggunakan metode CSA tersebut menghasilkan sembilan buah anomali, dimana anomali yang menarik perhatian untuk dibahas adalah anomali ke-8. Data parameter model anomali ke-8 tersebut adalah sebagai berikut  $x_1=803,8$  meter,  $z_1=11,06$  meter,  $x_2=780,2$  meter, dan  $z_2=102,74$  meter. Berdasarkan data tersebut, jika dikorelasikan dengan lokasi titik-titik pengukuran pada Gambar 3, terlihat bahwa anomali ke-8 ini berada tepat ketika titik-titik pengukuran memotong Sesar Grindulu. Hal ini merupakan salah satu indikasi bahwa anomali ke-8 adalah representasi Sesar Grindulu di daerah penelitian.

Data  $x_1$  dan  $z_1$  menunjukkan bahwa Sesar Grindulu teridentifikasi pada jarak 803,8 meter dari titik awal pengukuran di kedalaman 11,06 meter. Selanjutnya, data  $x_2$  memperlihatkan bahwa bidang sesarnya berarah miring ke kiri (anomali ke-8 pada Gambar 7 panel bawah), sedangkan data  $z_2$  adalah batas kedalaman yang dapat terdeteksi oleh metode SP. Berdasarkan nilai dari data-data tersebut, melalui perhitungan matematik sederhana dapat diperoleh sudut kemiringan Sesar Grindulu di daerah penelitian. Ilustrasi sudut kemiringan bidang sesar dan kedalaman Sesar Grindulu diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kimiringan bidang sesar (*dip*) dan kedalaman model Sesar Grindulu

Berdasarkan data dan bentuk anomali pada Gambar 8, selanjutnya dapat dibuat model Sesar Grindulu yang dihasilkan menggunakan metode CSA pada data SP. Model Sesar Grindulu ini kemudian di-*overlay* dengan peta lokasi dan titik-titik pengukuran untuk memvisualisasikan bentuk dan posisi Sesar Grindulu di daerah penelitian. Visualisasi model Sesar Grindulu ini dapat dilihat pada Gambar 9, dimana arah strike Sesar Grindulu diambil berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Cholifah *et al.* [20] yang menyebutkan bahwa Sesar Grindulu secara umum berarah N60°E.



Gambar 9. Visualisasi model Sesar Grindulu berdasarkan metode CSA pada data SP

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diuraikan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa pemodelan inversi menggunakan metode CSA dengan model berbentuk lempeng miring (*inclined sheet*) pada data SP berhasil mengidentifikasi sembilan model anomali yang diduga berupa sesar (*fault*) atau retakan (*fracture*). Sebuah model anomali yang berada di 803,8 meter dari titik awal dengan kedalaman antara 11,06 hingga 102,74 meter diidentifikasi sebagai Sesar Grindulu dengan melihat kondisi bahwa posisi anomali tersebut tepat berada pada terjadinya perpotongan antara titik-titik pengukuran dengan Sesar Grindulu. Selanjutnya, berdasarkan data-data  $x_1$ ,  $z_1$ ,  $x_2$ , dan  $z_2$  diketahui bahwa kemiringan bidang sesar (*dip*) pada daerah penelitian sebesar 75,58°.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan penulis sampaikan kepada teman-teman di Laboratorium Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Analitika Data ITS yang telah membantu dalam proses akuisisi data di lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Irsyam *et al.*, *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*, 1st ed. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Kementerian PUPR, 2017.
- [2] H. Samodra, S. Gafoer, and S. Tjokrosapoetro, “Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa.” Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1992.
- [3] B. T. Laksono, “Hasil Sensus Penduduk Kabupaten Pacitan Tahun 2020,” Pacitan, Jan. 2021.
- [4] A. Haryono, “Analisis Pola Tegangan untuk Menentukan Tipe Sesar Grindulu di Pacitan, Jawa Timur,” *Jurnal Geosains Kutai Basin*, vol. 5, no. 2, pp. 73–79, 2022.
- [5] A. Haryono, Sungkono, M. A. Caesardi, B. J. Santosa, F. Syaifuddin, and A. Widodo, “Estimation of Shear Wave Velocity Using Horizontal to Vertical Spectrum Ratio (HVSR) Inversion to Identify Faults in Pacitan,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012051.
- [6] N. E. Huang *et al.*, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” *The Royal Society*, vol. 454, pp. 903–995, 1998.
- [7] M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, “Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing,” *Biomed Signal Process Control*, vol. 14, no. 1, pp. 19–29, 2014, doi: 10.1016/j.bspc.2014.06.009.
- [8] M. E. Torres, M. A. Colominas, G. Schlotthauer, and P. Flandrin, “A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,” in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Prague: IEEE, Jul. 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5947265>.
- [9] M. Wang, Z. Zhou, Z. Li, and Y. Zeng, “An Adaptive Denoising Algorithm for Chaotic Signals Based on Improved Empirical Mode Decomposition,” *Circuits Syst Signal Process*, vol. 38, no. 6, pp. 2471–2488, Jun. 2019, doi: 10.1007/s00034-018-0973-7.
- [10] Z. Wu and N. E. Huang, “Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise Assisted Data Analysis Method,” 2005.
- [11] Y. Wang, Z. Fan, H. Liu, and X. Gao, “Planetary gearbox fault diagnosis based on ICEEMD-time-frequency information entropy and VPMCD,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/AP10186376.
- [12] P. Díaz *et al.*, “An improved crow search algorithm applied to energy problems,” *Energies (Basel)*, vol. 11, pp. 1–22, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11030571.

- [13] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm," *Comput Struct*, vol. 169, pp. 1–12, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.compstruc.2016.03.001.
- [14] A. Biswas and S. P. Sharma, "Optimization of self-potential interpretation of 2-D inclined sheet-type structures based on very fast simulated annealing and analysis of ambiguity," *J Appl Geophy*, vol. 105, pp. 235–247, 2014, doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.03.023.
- [15] A. Biswas and S. P. Sharma, "Resolution of multiple sheet-type structures in self-potential measurement," *Journal of Earth System*, vol. 123, no. 4, pp. 809–825, 2014.
- [16] Ngadenin, L. Subiantoro, and K. S. Widana, "Studi Awal Geologi di Wilayah Kabupaten Pamekasan untuk Mendukung Pemilihan Calon Tapak Instalasi Desalinasi Nuklir," *Eksplorium*, vol. 35, no. 1, pp. 29–42, 2014.
- [17] A. Haryono, Sungkono, R. Agustin, B. J. Santosa, A. Widodo, and B. Ramadhany, "Model parameter estimation and its uncertainty for 2-D inclined sheet structure in self-potential data using crow search algorithm," *Acta Geodaetica et Geophysica*, vol. 55, no. 4, pp. 691–715, Dec. 2020, doi: 10.1007/s40328-020-00321-5.
- [18] X. Li and M. Yin, "Application of Differential Evolution Algorithm on Self-Potential Data," *PLoS One*, vol. 7, no. 12, Dec. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0051199.
- [19] S. A. Mehane, "An efficient regularized inversion approach for self-potential data interpretation of ore exploration using a mix of logarithmic and non-logarithmic model parameters," *Ore Geol Rev*, vol. 57, pp. 87–115, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.oregeorev.2013.09.002.
- [20] L. Cholifah, N. Mufidah, E. Lazuardi, B. J. Santosa, S. Sungkono, and A. Haryono, "Identification of the Grindulu Fault in Pacitan, East Java using Magnetic Method," *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, vol. 10, no. 1, pp. 22–33, Jul. 2020, doi: 10.26740/jpfa.v10n1.p22-33.