

Pemodelan Zona Patahan Berdasarkan Anomali *Self Potensial* (SP) Menggunakan Metode *Simulated Annealing*

Wilén¹⁾, Yudha Arman¹⁾, Yoga Satria Putra¹⁾

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Tanjungpura, Pontianak
Email : wilén_fineza@yahoo.com

Abstrak

Telah dibuat pemodelan untuk mengidentifikasi zona patahan berdasarkan anomali *Self Potential* (SP) menggunakan metode *Simulated Annealing* (SA). Penyelesaian masalah optimasi fungsi ini dengan mencocokkan model inversi dengan model sintetiknya. Parameter model yang digunakan berupa panjang sesar (l), lebar sesar (t), *strike* (α), *dip* (δ), koordinat origin sesar (x_0, y_0, z_0), dan potensial bidang sesar (F_0). Penyelesaian pemodelan kedepan (*forward modeling*) dilakukan dengan memasukkan 8 (delapan) parameter model untuk mencari data teoritis. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa model hasil inversi yang didapat mendekati model sintetik yang diplot kedalam bentuk kontur berdasarkan nilai SP. Untuk satu struktur bidang patahan, penurunan energi minimum (*RMS error*) sebesar 1,272 dan untuk tiga struktur bidang patahan, penurunan energi minimum (*RMS error*) sebesar 21,99.

Kata Kunci : *Self Potensial* (SP), *Simulated Annealing*, Zona Patahan

1. Pendahuluan

Adanya aktivitas *geothermal* di bawah permukaan ditandai adanya sumber air panas di permukaan. Akibat perambatan panas dan tekanan fluida panas dari bawah permukaan memungkinkan fluida mengalir ke permukaan, dan terjadilah patahan yang disebut sesar. Keberadaan prospek *geothermal* di bawah permukaan juga ditandai dengan adanya kontras nilai SP yang besar (anomali) SP di daerah pengukuran. Adanya anomali disebabkan adanya mekanisme *thermoelectric* pada proses perambatan panas dari bawah menuju permukaan yang mengubah potensial diri struktur batuan yang dilewatinya.

Adanya kontras nilai SP yang besar pada saat pengukuran menandakan keberadaan prospek *geothermal* di bawah permukaan. Diperlukan proses pemodelan geofisika untuk identifikasi dan karakterisasi penyebab anomali SP. Pemodelan kedepan SP yang dilakukan berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Fitterman. Memodelkan anomali SP pada bidang kontak vertikal (Fitterman, 1979). Penggunaan fungsi *Green* untuk permasalahan potensial pada sumber arus dc terkontrol, pemodelan anomali SP secara vertikal (Fitterman, 1983) dan anomali SP berdasarkan mekanisme *thermoelectric* yang berasosiasi dengan sudut ruang sumber anomali (Fitterman, 1984). Pemodelan inversi pernah dilakukan oleh Arman (2002), menggunakan inversi non linier dengan pendekatan linier. Namun metode ini sangat sensitif dalam pemilihan model awal sehingga sering mengantarkan pemodelan terjebak pada nilai minimum lokal. Untuk menghindari hal tersebut

diperlukan sebuah pemodelan dengan ranah domain untuk evaluasi solusi yang lebih besar sehingga tidak mudah terjebak pada minimum lokal.

Salah satu metode pencarian acak murni adalah *Simulated Annealing* (SA). Metode ini digunakan untuk mencari pendekatan model terhadap solusi optimum global dari suatu permasalahan optimasi kombinatorial, dengan ruang pencarian solusi yang ada terlalu besar. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang menggunakan metode SA diantaranya adalah aplikasi desktop pencarian rute jalan dengan algoritma *Simulated Annealing* (Aritonang dan Emanuel, 2008), dan optimasi pada traveling salesman problem (TSP) dengan pendekatan *annealing* (Rizal, 2007). Dapat disimpulkan bahwa algoritma ini dapat menghasilkan suatu solusi optimal dalam waktu yang relatif singkat.

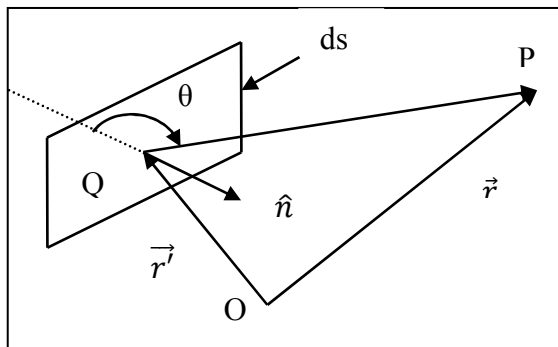
Pembuktian keakuratan pencarian acak pada penelitian ini dilakukan dengan pengujian data sintetik berupa sumber sesar dan tiga sumber sesar yang berasosiasi dengan zona mineralisasi dan daerah *geothermal*.

2. Landasan Teori

2.1 Pemodelan Kedepan *Self Potensial*

Pemodelan dilakukan untuk mendekati model yang didapat dari hasil inversi terhadap data sintetik. Data sintetik yang digunakan dalam pemodelan didapat dari hasil perhitungan secara teoritis menggunakan persamaan matematis yang diturunkan berdasarkan konsep fisika dari masalah yang ditinjau. Dalam proses pendekatan antara

respon model dengan data lapangan, dapat dilakukan proses coba-coba dengan mengubah nilai parameter model (Grandis, 2009).



Gambar 1. Bidang geometri titik observasi terhadap titik koordinat (Arman, 2002)

dengan:

- Q = Geometri titik sumber
- P = Titik observasi
- N = Bidang normal dari bidang sumber
- O = Titik koordinat asal yang berubah-ubah.

Fungsi Green merupakan solusi untuk menyelesaikan persamaan Laplace yang digunakan dalam pemodelan kedepan SP

$$\psi(r) = \int s''F(r')G(r, r')ds'' \tag{1}$$

dengan:

- Ψ = Potensial listrik total.
- $G(r', r')$ = Fungsi Green.
- S' = Bidang sumber
- $F(r')$ = Intensitas sumber

Solusi permasalahan potensial dc (arus searah) dalam fungsi Green adalah:

$$G(r, r') = \frac{\sigma}{j} n \cdot \nabla' \Phi(r, r') \tag{2}$$

dengan $\Phi(r, r')$ yaitu potensial pada titik r yang berhubungan dengan intensitas arus J ketika diinjeksikan pada titik r'.

Fungsi Green untuk seluruh ruang adalah:

$$G(r, r') = n \cdot \frac{\nabla' 1}{4\pi|r-r'|} \tag{3}$$

Ketika perubahan potensial listrik total akibat intensitas sumber diskontinuitas terjadi, sumber dilalui arus listrik pada arah bidang normal n dan total potensial listrik menjadi:

$$\begin{aligned} \Psi(r) &= \frac{1}{4\pi} \int s'F(r') n \cdot \nabla' \frac{1}{|r-r'|} \\ &= \frac{-1}{4\pi} \int s'F(r') \frac{\cos\theta}{|r-r'|^2} dS' \\ &= \frac{-1}{4\pi} \int s'F(r')d\Omega \end{aligned} \tag{4}$$

dengan $d\Omega$ adalah elemen diferensial solid angle dan θ merupakan sudut antara normal bidang n dan $r-r'$. Potensial listrik total merupakan perbandingan antara solid angle yang dibentuk oleh sumber pada titik pengukuran dan solid angle seluruh ruang.

Potensial listrik dari Persamaan (4) diberi fungsi distribusi intensitas sumber, yang ekuivalen dengan potensial skalar magnetik ketika arah magnetisasi paralel terhadap \hat{n} . Jika intensitas sumber konstan maka Persamaan (4) menjadi:

$$\psi(r) = \frac{-F_0}{4\pi} \Omega(r, r') \tag{5}$$

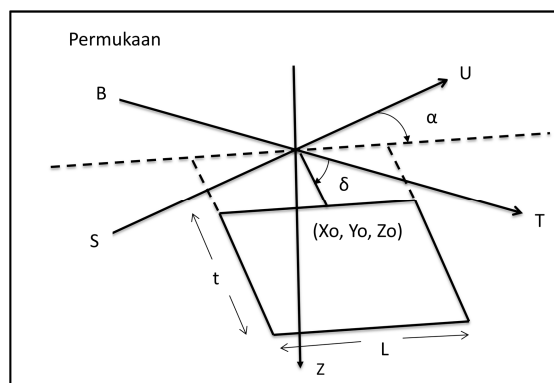
Potensial listrik total pada sisi bidang sumber yang saling berlawanan adalah $\pm F_0/2$. Solid angle mencapai nilai $\pm 2\pi$ pada saat titik pengukuran mendekati bidang sumber (S' sangat dekat dengan r') maka sumber terlihat seperti bidang tak hingga.

Untuk memperoleh kondisi batas setengah ruangan digunakan sumber bayangan (image source) diatas setengah ruangan untuk seluruh sumber di dalamnya. Total potensial listrik menjadi:

$$\psi(r) = \frac{-F_0}{4\pi} [\Omega(r, r') + \Omega(r, r'')] \tag{6}$$

dengan:

- r' = (x', y', z')
- r'' = $(x', y', -z')$



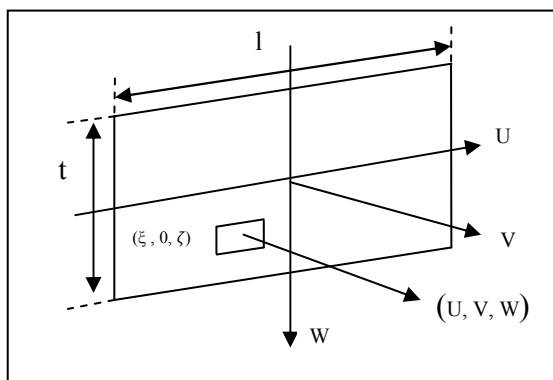
Gambar 2. Geometri sumber miring sudut strike α dan dip δ . Letak (x_0, y_0, z_0) pada bagian tengah atas sumber (Arman, 2002)

Solid angle pada Persamaan (6) bernilai sama dan potensial listrik total menjadi:

$$\psi(r) = \frac{-F_0}{2\pi} \Omega(r, r') \quad (7)$$

Sumber anomali dianggap sebagai bidang miring yang menyebabkan terjadinya mekanisme *thermoelectric* pada daerah pengambilan data. Bidang sumber memiliki sudut *strike* α dan *dip* δ serta panjang *strike* l , dan ketebalan pada arah kemiringan *dip* t . Kedalaman bidang sumber adalah z_0 .

Sudut ruang dari bidang sumber persegi empat pada titik pengukuran (u, v, w) dihitung pada sistem koordinat yang berpusat pada bidang sumber.



Gambar 3. Sistem koordinat yang dipakai dalam perhitungan *solid angle* untuk sumber persegi empat (Arman, 2002)

Kemudian koordinat ditranslasikan dan dirotasikan ke sistem koordinat global seperti pada Gambar 3.

Solid angle di (u, v, w) dirumuskan sebagai:

$$\Omega(u, v, w) = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} d\xi \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} d\zeta \frac{\cos\theta}{r^3} = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} d\xi \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} d\zeta \frac{v}{r^3} \quad (8)$$

dengan $\cos\theta = \frac{v}{r}$ dan $r^2 = (\xi - u)^2 + v^2 + (\zeta - w)^2$

dengan menggunakan hubungan:

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\zeta - w}{r} \right] = \frac{1}{r} - \frac{(\zeta - w)^2}{r^3} = \frac{(\xi - u)^2 + v^2}{r^3} \quad (9)$$

maka diperoleh:

$$\frac{1}{r^3} = \frac{1}{(\xi - u)^2 + v^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\zeta - w}{r} \right] \quad (10)$$

Substitusikan Persamaan (10) ke dalam Persamaan (8) menghasilkan:

$$\Omega(u, v, w) = - \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} d\xi \frac{v}{(\xi - u)^2 + v^2} \frac{\zeta - w}{r} \Big|_{\xi = -t/2}^{t/2} = - \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} d\xi \frac{v}{(\xi - u)^2 + v^2}$$

$$\left\{ \frac{\frac{t-w}{2}}{[(\xi-u)^2+v^2+(\frac{t-w}{2})^2]^{1/2}} + \frac{\frac{t+w}{2}}{[(\xi-u)^2+v^2+(\frac{t-w}{2})^2]^{1/2}} \right\} \quad (11)$$

dengan bantuan integral definite berikut:

$$\int \frac{vw}{u^2 + v^2} \frac{du}{\rho} = \tan^{-1} \frac{uw}{v\rho}$$

$$\rho^2 = u^2 + v^2 + z^2,$$

Persamaan (11) menjadi:

$$\Omega(u, v, w) = -f(u, v, w; l/2, t/2) + f(u, v, w; -l/2, t/2) + f(u, v, w; l/2, -t/2) - f(u, v, w; -l/2, -t/2) \quad (12)$$

dengan:

$$f(u, v, w, a, b) = \tan^{-1} \left[\frac{(u-a)(w-b)}{v[(u-a)^2 + v^2 + (w-b)^2]^{1/2}} \right] \quad (13)$$

Hubungan sistem koordinat lokal (u, v, w) dengan sistem koordinat global (x, y, z) dirumuskan sebagai suatu sistem matriks:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \delta \sin \alpha & \sin \delta \cos \alpha & -\cos \delta \\ -\cos \delta \sin \alpha & \cos \delta \cos \alpha & \sin \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \dots(14)$$

dengan

$$x' = x - x_0 + \frac{t}{2} \cos \delta \sin \alpha \quad (15)a$$

$$y' = y - y_0 - \frac{t}{2} \cos \delta \cos \alpha \quad (15)b$$

$$z' = z - z_0 - \frac{t}{2} \sin \delta, \quad (15)c$$

Hasil dari perhitungan *Solid Angle* digunakan untuk menghitung potensial sebagai fungsi parameter model $(x_0, y_0, z_0, t, l, \alpha, \delta, F_0)$.

2.2 Simulated Annealing

Simulated Annealing adalah suatu metode pencarian acak terarah yang dikembangkan berdasarkan analogi dari prinsip pembentukan kristal pada suatu substansi. Ditinjau dari ilmu fisika, proses *annealing* (pendinginan) dalam algoritma ini bertujuan untuk meminimalkan energi potensial dalam masalah optimasi yang

tidak hanya menerima nilai objektif yang selalu turun, tetapi juga menerima nilai objektif yang naik, sehingga dianggap mampu untuk menghindari jebakan optimal lokal (Rizal, 2007).

Suatu *state* (kombinasi dari satu solusi) pada algoritma SA dapat diterima dengan kemungkinan:

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (16)$$

dengan :

ΔE = Selisih energi
 K = Konstanta Boltzmann
 T = Temperatur

Hal yang perlu diperhatikan dalam algoritma *Simulated Annealing*, yaitu :

1. *State*: *State* adalah kombinasi nilai dari suatu solusi.
2. Energi: Energi diartikan sebagai seberapa besar nilai fungsi objektif.
3. Temperatur: Temperatur adalah suatu nilai kontrol yang membuat suatu *state* acak akan bisa bergerak naik atau tidak.
4. Proses *Update State*: Pada *Simulated Annealing* ini *state* akan diterima dengan probabilitas yang telah ditentukan.
5. *Cooling Schedule* : Penggunaan *cooling schedule* pada *Simulated Annealing* untuk menurunkan temperatur pada setiap iterasinya. Semua model *cooling schedule* mempunyai syarat batas nilai *T* tidak boleh sama dengan nol, meskipun harus kecil.

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan-tahapan: studi pustaka, analisis data, pembuatan *forward modelling*, pemodelan dengan metode *Simulated Annealing*, analisis hasil, dan kesimpulan. Mekanisme pemodelan data sintetik hasil dari *forward modeling* SP ini untuk mendapatkan model atau solusi dengan respon yang paling sesuai dengan data yang diperoleh dari hasil pengukuran. Kesesuaian tersebut dinyatakan dengan fungsi objektif. Dalam meminimumkan fungsi objektif ini digunakan metode SA.

4. Hasil dan Diskusi

Tahap awal yang dilakukan adalah mencari data teoritis dengan memasukkan 8 (delapan) parameter model melalui penyelesaian pemodelan kedepan (*forward modeling*). Data sintetik ditambahkan noise secara acak dengan distribusi *uniform* atau normal dengan tujuan agar data sintetik yang dihasilkan lebih realistis. Nilai SP yang dihasilkan kemudian di plot dalam bentuk kontur. Pada penelitian pemodelan menggunakan metode *Simulated Annealing* ini nilai SP yang dihasilkan dari data sintetik

dianggap sebagai data observasi atau data lapangan.

4.1 Pemodelan data sintetik satu sesar

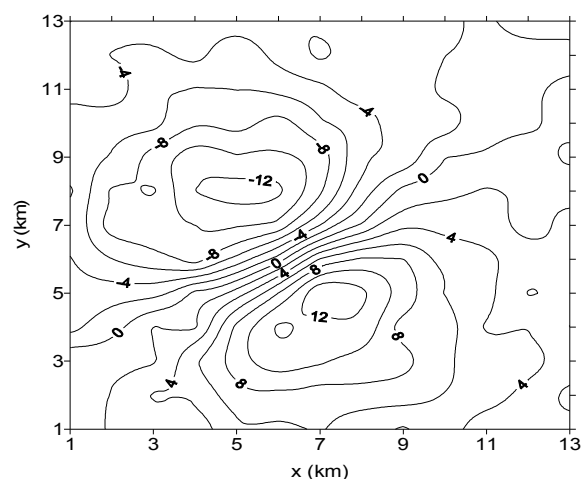
Data sintetik pertama adalah data anomali SP yang dibangkitkan dengan pemodelan kedepan yang telah ditambah *noise* dengan distribusi normal, rata-rata 0 dan standar deviasi 10% untuk satu struktur patahan, luas daerah 13 x 13 km dengan jumlah data 169.

Model sintetik satu sesar terdiri dari delapan parameter yaitu berupa panjang sesar (*l*), lebar sesar, *strike* (α), dip (δ), koordinat *origin* sesar (x_0, y_0, z_0) serta potensial bidang sesar (F_0). Tabel 1. memperlihatkan parameter model sintetik yang digunakan, parameter model awal serta parameter model hasil inversi.

Tabel 1. Hasil inversi data sintetik satu sesar

Parameter	Model Sintetik	Model Awal	Hasil Inversi
L (km)	4	10	5.2781
T (km)	0.7	1	0.4860
α (°)	60	90	61.9370
δ (°)	90	30	88.2842
X0 (km)	6	3	6.1095
Y0 (km)	6	7	6.4763
Z0 (km)	2	1	1.7674
F0 (mV)	500	500	479.8246

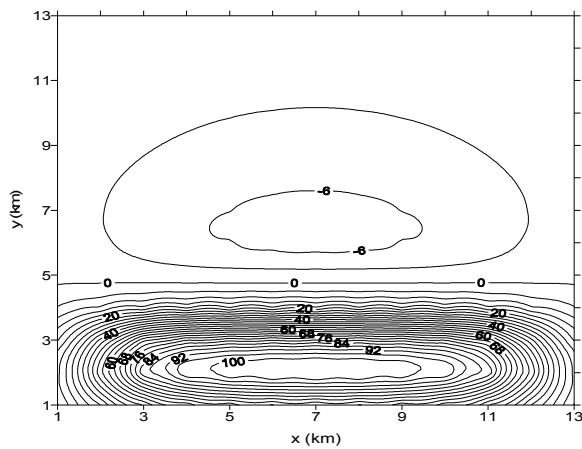
Pada Gambar 4 adalah kontur hasil model sintetik yang telah diberi noise berdistribusi normal dengan interval kontur 2 mV, dengan potensial listrik -12 Mv s.d 12 mV.



Gambar 4. Kontur ekuiopotensial model sintetik dengan interval 2 mV

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat penetapan model awal yang digunakan cukup jauh dari model sintetik. Hal ini dimaksudkan untuk menguji keakuratan program inversi dengan metode SA.

Gambar 5 adalah kontur hasil model awal yang digunakan dalam proses inversi dengan interval kontur 2 mV dan potensial listrik 0 Mv s.d 100 mV.

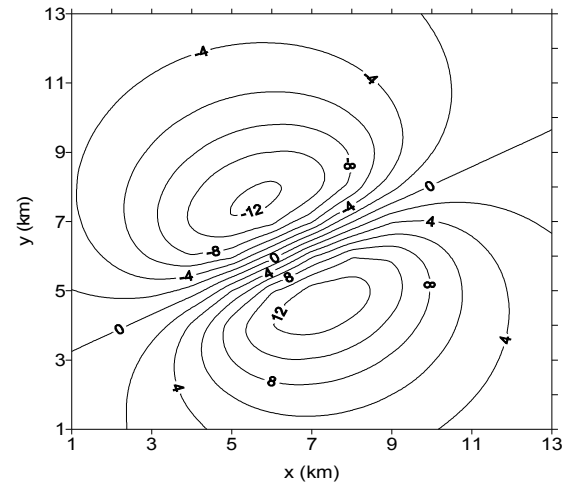


Gambar 5. Kontur ekuipotensial model awal dengan interval 2 mV

Dalam program yang dibuat sebagai simulasi, model awal ini dianggap sebagai data kalkulasi₁, kemudian dibuat suatu model baru dengan menambahkan bilangan acak sebesar 10% dari model awal namun tetap berdistribusi normal. Model baru ini dibuat dengan maksud untuk memperbaiki model awal atau sama dengan model sebelumnya.

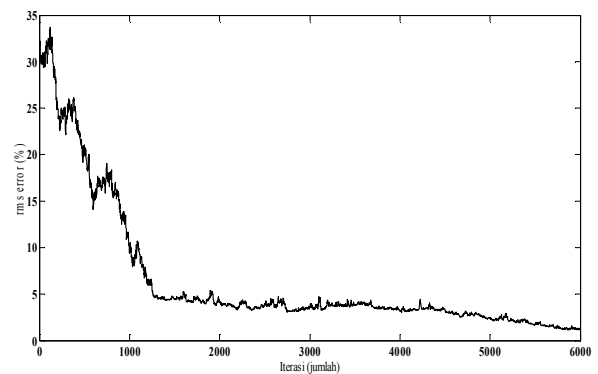
Penambahan persentasi sebesar 10% dari model awal ini mempermudah dalam proses *update state*. Setelah dilakukan perhitungan *RMS error* yaitu untuk mengetahui selisih nilai suatu model awal dengan data lapangan dan selisih model baru dengan data lapangan menggunakan rumus yang telah ditentukan maka suatu model dapat diterima atau ditolak dengan probabilitas $p = \exp(-\Delta E/KT)$. Jika $\Delta E \leq 0$, berarti model baru yang dihasilkan diterima karena lebih baik atau sama dengan model sebelumnya dan iterasi dilanjutkan menggunakan model baru dengan tujuan untuk mencari suatu fungsi model yang makin rendah. Jika model yang baru ditolak, maka iterasi dilanjutkan menggunakan model yang sebelumnya dengan menurunkan suhu.

Walaupun penetapan model awal cukup jauh dari model sintetik namun berdasarkan Gambar 6 kontur dari hasil inversi pada iterasi ke 6000 hasil yang diperoleh cukup dekat dan dapat menggambarkan model sintetik dengan cukup baik. Dalam program yang dibuat sebagai simulasi iterasi dimulai dengan nilai temperatur $T_0 = 50$ dengan n iterasi sebanyak 6000 dan i adalah faktor penurunan temperatur dipilih 0,001.



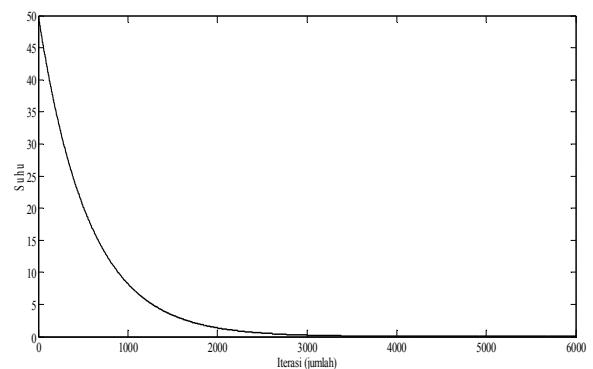
Gambar 6. Kontur ekuipotensial hasil inversi dengan interval 2 mV

Dari Gambar 6 yaitu kontur hasil inversi yang diplot berdasarkan anomali SP dengan range potensial listrik -12 mV s.d 12 mV dengan interval kontur 2 mV.



Gambar 7. Grafik penurunan energi

Pada Grafik digambar 7. dapat dilihat bahwa hasil inversi solusi terbaik telah diperoleh dengan rms error sebesar 1.272.



Gambar 8. Grafik penurunan suhu

4.2 Inversi data sintetik tiga sesar

Model sintetik tiga sesar adalah model sintetik untuk tiga struktur bidang sesar. Ukuran daerah perhitungan untuk model sintetik kedua adalah 13 x 13 km dengan jumlah data sebanyak 169. Tabel dibawah memperlihatkan parameter model sintetik, model awal yang digunakan serta parameter model hasil inversi.

Tabel 2. Hasil inversi data sintetik untuk parameter sesar 1

Parameter Sesar 1	Model Sintetik	Model Awal	Hasil Inversi
L (km)	4	6	4.93047
T (km)	0.5	1	0.14228
α (°)	150	160	158.281
δ (°)	80	50	49.386
X0 (km)	4	3	2.3004
Y0 (km)	4	5	4.2861
Z0 (km)	1	0.1	0.15079
F0 (mV)	500	500	495.677

Model awal untuk parameter sesar 1, sesar diasumsikan terletak pada koordinat (3,5).

Tabel 3. Hasil inversi data sintetik untuk parameter sesar 2

Parameter Sesar 2	Model Sintetik	Model Awal	Hasil Inversi
L (km)	4	6	9.0037
T (km)	0.5	1	0.6685
α (°)	90	80	76.6786
δ (°)	75	60	49.0628
X0 (km)	8	9	8.2562
Y0 (km)	8	10	9.8369
Z0 (km)	0.1	0.5	0.65447
F0 (mV)	400	401	418.0847

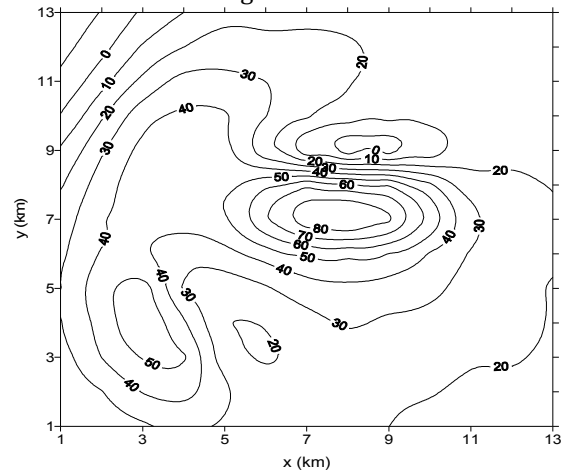
Model awal untuk parameter sesar 2, sesar diasumsikan terletak pada koordinat (9,10).

Tabel 4. Hasil inversi data sintetik untuk parameter sesar 3

Parameter Sesar 3	Model Sintetik	Model Awal	Hasil Inversi
L (km)	4.5	7	9.84504
T (km)	9.5	2	1.54418
α (°)	30	50	38.6936
δ (°)	70	10	12.0908
X0 (km)	10	8	9.9097
Y0 (km)	2	1.5	1.4674
Z0 (km)	2.5	2	2.6964
F0 (mV)	500	501	506.287

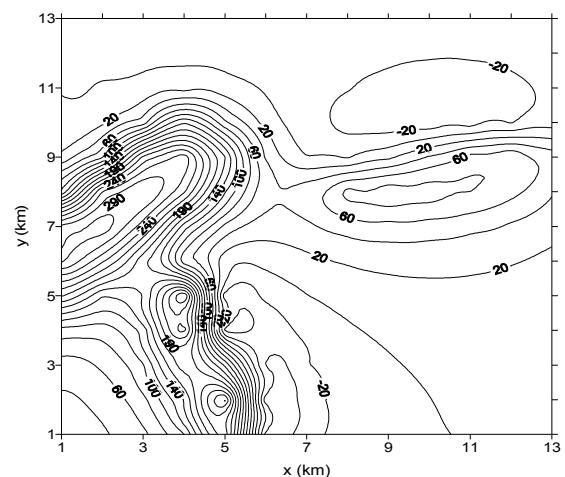
Model awal untuk parameter sesar 1, sesar diasumsikan terletak pada koordinat (8,1.5).

Data teoritis untuk tiga struktur bidang sesar diperoleh melalui penyelesaian pemodelan kedepan dengan menjumlahkan parameter model sintetik sesar 1, parameter model sintetik sesar 2, dan parameter model sintetik sesar 3 sebagai masukan.



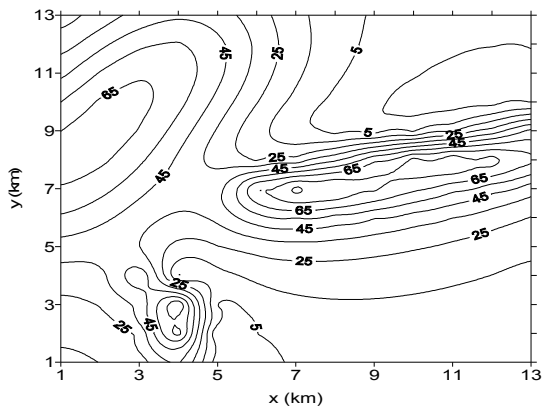
Gambar 9. Kontur ekuipotensial model sintetik dengan interval 10 mV

Gambar diatas menampilkan kontur hasil model sintetik dengan interval kontur 10 mV. Respon potensial berkisar -20 mV s.d 80 mV. Interpretasi keberadaan sesar dapat dilakukan dengan mengenali respon yang dihasilkan oleh sesar berupa pola lingkaran yang menyerupai pengkutuban pola medan magnet. Asumsi yang digunakan dalam penentuan model awal adalah diketahuinya koordinat origin permukaan sesar (x, y).



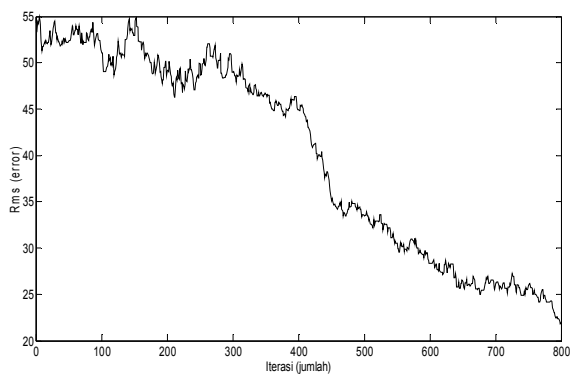
Gambar 10. Kontur ekuipotensial model awal dengan interval 10 mV

Gambar 10. menampilkan gambar kontur hasil model awal yang digunakan dalam proses inversi dengan interval kontur 10 mV, dimana potensial berkisar -40 mV s.d 120 mV.



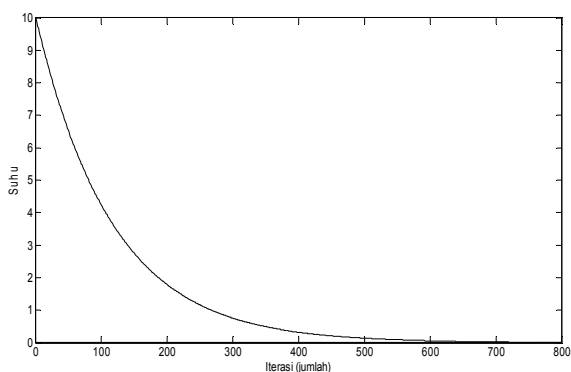
Gambar 11. Kontur ekuipotensial hasil inversi dengan interval 10 mV

Dari Gambar 11 terlihat bahwa model hasil inversi cukup dapat mempresentasikan model sintetik dengan baik, dengan interval 10 mV dan respon potensial yang dihasilkan berkisar -20 mV s.d 80 mV.



Gambar 12. Grafik penurunan energi

Dari Gambar 12 dapat dilihat penurunan energi minimum dengan RMS error sebesar 21,99, dengan respon seperti yang diperlihatkan pada Gambar 12. Kontur hasil inversi yang diplot berdasarkan nilai anomali SP.



Gambar 13. Grafik penurunan suhu

Pada proses inversi kasus tiga struktur sesar T_0 yang digunakan adalah 10 dengan n iterasi sebanyak 800 dan i adalah faktor penurunan temperatur dipilih 0.01.

5. Kesimpulan

1. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, model yang diperoleh untuk satu dan tiga struktur patahan cukup mendekati terhadap data sintetik. Dengan ini metode *Simulated Annealing* dianggap mampu untuk mengidentifikasi pendugaan zona patahan berdasarkan anomali SP pada data anomali SP.
2. Pemilihan model awal dan penetapan suhu awal serta fungsi penurunan suhu sangat sensitif dalam proses simulasi.

6. Pustaka

- Arman, Y., 2002, *Pemodelan Zona Patahan Berdasarkan Anomali Self Potensial (SP)*, Bandung, Tugas Akhir S-1 Program Studi Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB.
- Aritonang, A.F. dan Emanuel, A.W.R., 2008, *Aplikasi Desktop Pencarian Rute Jalan Dengan Algoritma Simulated Annealing*, Jurnal Informatika, Vol. 4, No. 2, Hlm. 93-103.
- Fitterman, D.V., 1979a, Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts : *Geophysics*, v.44,p.195-205.
- Fitterman, D.V., 1979b, Relationship of the self-potential Green's function to solutions of controlled-source direct-current potential problems : *Geophysics*, v.44, no.11, p.1879-1881.
- Fitterman, D.V., 1983, Modeling of the self-potential anomalies near vertikal dikes : *Geophysics*, v.48, no.2, p.171-180.
- Fitterman, D.V., 1984, Thermoelectrical self-potential anomalies and their relationship to the solid angle subtended by the source region : *Geophysics*, v.49, no.2, p.165-170s.
- Grandis, H., 2009, *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta 12540.
- Rizal, J, 2007, *Optimasi Pada Traveling Salesman Problem (TSP) Dengan Pendekatan Simulasi Annealing*, Jurnal Gradien, Vol. 3, No. 2, Hlm. 286-290