



## **Dimensionality Analysis of Magnetotelluric Data Crossing the Sumatran Fault System at Aceh Segment**

**Khumaidi, Fadhli, Nazli Ismail**

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Syiah Kuala, Darussalam 23111 Banda Aceh, Indonesia. Email:

**Abstract.** Dimensionality of magnetotelluric transfer functions have been analyzed crossing the Sumatran Fault System at Aceh segment. The research was aimed to determine strike direction of the fault system using magnetotelluric transfer function data. We used Phoenix Geophysics MTU-5A equipment in range frequency 0.86-320 Hz for data measurement. Collection of data was performed along two profiles with spacing between stations vary from 7 to 80 Km. The first profile started 94.5 Km from Aceh Jaya District and ended at Pidie District. The second profile started 16.5 Km from Aceh Jaya District and ended at Bireuen District. The data were analyzed by using Zhang et al. (1989) method to calculate Swift's skew and strike direction. Based on the calculation, we found that the Swift's skew values were generally less than 0.1, which were usually the overall structure of local and regional and they could be viewed as a 1D or 2D, and the values above 0.1 were considered as 3D effects or noises. Furthermore, the average strike has  $0^\circ$  or  $90^\circ$  angle. The data showed that geoelectrical strikes of both profiles were in agreement with the geological structure of the fault system. In order to get image of the 2D resistivity model of the area, we had inverted the magnetotelluric data using MT2DinvMatlab (Lee et al., 2009). The model showed clearly position and depth of the fault lines along the profiles.

**Keywords:** *Fault, magnetotelluric, dimensionality, 2D models.*

## I. PENGANTAR

Aceh merupakan salah satu wilayah yang rawan akan gempa bumi khususnya gempa darat yang dipengaruhi oleh aktivitas Sesar Sumatera Segmen Aceh dan Seulimum. Dimana efek dari bencana gempa bumi tersebut berdampak pada kerusakan infrastruktur dan korban jiwa. Untuk itu, perlu adanya penelitian tentang geometri Sesar Sumatera, supaya dapat dijadikan pedoman untuk program mitigasi bencana di Sumatera khususnya di Aceh.

Untuk mengetahui atau mempelajari geometri Sesar Sumatera tersebut, banyak metode geofisika yang bisa digunakan, diantaranya adalah metode GPR (*ground penetrating radar*), geolistrik, VLF (*very low frequency*), MT (*Magnetotelluric*), dan lain-lain. Namun, dalam penelitian ini penulis menggunakan metode MT, karena metode MT memiliki frekuensi yang sangat rendah ( $10^{-4}$  Hz - 1 kHz), sehingga mampu memetakan struktur bawah permukaan hingga beberapa kilometer termasuk keberadaan sesar atau patahan.

Kebanyakan permodelan data MT dilakukan dengan menggunakan program 2D (2-dimensi). Artinya, jika program hanya melakukan permodelan 2D, maka data MT juga harus memenuhi sifat 2D geoelektriknya. Secara konvensional, sifat 2D struktur sering diasumsikan dari struktur 2D geologi, padahal, struktur 2D geologi belum tentu sama dengan struktur 2D geoelektrik. Untuk itu perlu dilakukan analisis dimensionalitas data pengukuran sebelum dilakukan proses permodelan 2D. Untuk itu, pada penelitian ini dilakukan analisis dimensionalitas data MT yang diukur pada Sesar Sumatera Segmen Aceh.

Ada beberapa metode yang digunakan untuk menganalisis dimensionalitas struktur bawah permukaan, seperti metode Bahr [1], metode Swift [2], dan metode Zhang [3]. Namun, dalam penelitian ini hanya digunakan metode Zhang [3] dan Swift [2] guna untuk mengetahui atau menghitung dimensionalitas dan arah strike.

## Teori Elektromagnetik MT

Untuk eksitasi gelombang bidang bahwa distribusi konduktivitas umum di dalam bumi, komponen-komponen medan listrik horizontal ( $E_x, E_y$ ) dan komponen-komponen medan magnetik vertikal ( $H_z$ ) atau komponen-komponen medan magnet horizontal ( $H_x, H_y$ ) dan komponen-komponen medan listrik vertikal ( $E_z$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut [4];

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \mathbf{Z} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

dan

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \mathbf{Y} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

$\mathbf{Z}$  adalah matriks 2x2 yang dikenal sebagai tensor impedansi bilangan kompleks dinyatakan dengan;

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

resistivitas semu bawah permukaan adalah sebagai berikut;

$$Z_{xx} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_y}{H_x}, \quad (4)$$

dan fase impedansi bawah permukaan diberikan;

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Z_{xy}}{Z_{xx}}. \quad (5)$$

## Tensor Impedansi Magnetotellurik 2D

Dalam sistem koordinat strike (sistem koordinat utama) tensor impedansi memiliki struktur sederhana yang khusus untuk persamaan TE dan TM-mode, mengikuti Persamaan (2) dan (3) dapat digunakan untuk menentukan tensor impedansi 2D yaitu [4];

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0 & \\ & 0 \end{pmatrix}, \quad \neq \quad , (6)$$

Dengan demikian perbedaan nilai dari resistivitas semu akan didapat ketika instrumen dirotasi sepanjang 90°. Ini disebut  $\rho_{xy}$  dan  $\rho_{yx}$ . Pada pengukuran di lapangan, kedua nilai ini diukur secara bersamaan. Masing-masing nilai tersebut memiliki fase yang terkait dalam arah  $xy$  dan  $yx$ .

Resistivitas semu dan fase dalam arah  $xy$  dihitung berdasarkan arah medan listrik yang sejajar dengan arah strike. Sedangkan medan magnet tegak lurus terhadap strike, yaitu disebut dengan TE mode. Sedangkan dalam arah  $yx$ , resistivitas semu dan fase dihitung berdasarkan arah medan magnet sejajar dengan strike dan medan listrik tegak lurus terhadap strike, disebut dengan TM mode. Komponen medan elektromagnetik yang terukur adalah  $(E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z)$  dan komponen medan elektromagnetik  $(R_{xx}, R_{yy}, R_{xy}, R_{yx})$  menghubungkan;

$$\begin{aligned} R_{xx} &= \rho_{xx} \cos^2 \theta + \rho_{yy} \sin^2 \theta + 2\rho_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ R_{yy} &= \rho_{xx} \sin^2 \theta + \rho_{yy} \cos^2 \theta - 2\rho_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ R_{xy} &= (\rho_{yy} - \rho_{xx}) \sin \theta \cos \theta + \rho_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

dimana  $\mathbf{R}$  adalah matriks rotasi didefinisikan sebagai;

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

Dalam sistem koordinat terukur seperti dalam gambar 1 Persamaan (1) dan (2)

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad (9)$$

dan

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

Dengan menggunakan Persamaan (7) maka

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

dan

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

dimana  $\mathbf{T}$  yang ditulis di atas menunjukkan transpos dari  $\mathbf{R}$ . Pemodelan 2D diperoleh dengan data masukan berupa impedansi mode TE dan TM. Pemodelan bertujuan untuk mengekstrak informasi yang terkandung di dalam data sehingga diperoleh distribusi tahanan-jenis bawah permukaan melalui model-model.

### Analisis Dimensionalitas

Tensor impedansi dapat dianalisis untuk menduga dimensionalitas struktur resistivitas bawah permukaan. Nilai skew adalah invarian dan memberikan indikasi 3D [2] dimana didefinisikan sebagai Persamaan (13);

$$S = \frac{|Z_{xx} - Z_{yy}|}{|Z_{xy} + Z_{yx}|} \quad (13)$$

Swift skew merupakan perbandingan antara magnitude dari diagonal ( $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$ ) adalah nol dan komponen tak-diagonal ( $Z_{xy}$  dan  $Z_{yx}$ ) dari tensor impedans magnetotellurik, yang mana menghasilkan suatu ketetapan pengukuran tensor-tensor impedans yang mendekati tensor impedans ideal 2D. Pada yang demikian, jumlahan komponen-komponen diagonal harus saling menghilangkan satu sama lain. Biasanya, keseluruhan struktur, termasuk struktur lokal dan regional, dapat dipandang sebagai 1D atau 2D jika Swift's skew kurang dari 0,1, sedangkan nilai lebih dari 0,1 dianggap indikasi 3D atau noise buatan manusia [1].

Syarat untuk 1D dan 2D dapat dianalisa dengan metode yang dikemukakan oleh [3]. Ketika data menunjukkan ketidak-konsistenan strike regional sepanjang lintasan pengukuran, maka ketidak-konsistenan ini dapat dianalisa dengan menggunakan metode strike analisis [3]. Strike regional memberikan arah dari struktur regional 2D yang berlapisan dengan struktur regional 3D dibawahnya, maka dalam arah

regional strike tersebut, tensor impedans dapat dinyatakan sebagai;

$$= \quad \quad \quad (14)$$

Di sini,  $Z_{xx} = Z_{yx}$  dan  $Z_{yy} = Z_{xy} \cdot \beta$  dan  $\gamma$  adalah parameter distorsi lokal dalam bentuk konstanta real yang tak bergantung frekuensi tetapi bergantung pada jumlah stasiun. Strike regional tersebut diestimasi berdasarkan langkah-langkah berikut: merotasi tensor impedans dari  $0^\circ$  ke  $180^\circ$ , melakukan penskalaan tensor impedans yang telah dirotasi dengan melibatkan elemen diagonal dari kolom yang berkaitan, menghitung parameter distorsi  $\beta$  dan  $\gamma$  sebagai estimasi kwadrat terkecil terhadap beberapa jarak frekuensi dan stasiun, dan menghitung fungsi misfit,  $Q$  sebagai fungsi sudut rotasi untuk setiap stasiun dan frekuensi.

## II. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan (Gambar 3), yaitu tahap pengambilan data di lapangan dan tahap pengolahan data. Tahap pengambilan data di lapangan dilaksanakan di sepanjang dua lintasan, yaitu lintasan C dan lintasan D. Lintasan C berawal dari Kabupaten Aceh Jaya dan berakhir di Kabupaten Pidie. Sedangkan Lintasan D berawal dari Kabupaten Aceh Jaya dan berakhir di Kabupaten Bireun Provinsi Aceh (Gambar 2). Kemudian tahap pengolahan data dilakukan di Laboratorium Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Syiah Kuala Banda Aceh. Penelitian ini dimulai dari bulan Juli 2012 sampai Agustus 2013.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: *Magnetotelluric*, sensor magnetik (*coil*), elektroda, baterai 12 volt, GPS, kabel koil, kabel elektroda, laptop, kompas, meteran, *water pass*, dan Ohmmeter. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan adalah ember, skop, cangkul, garam dan alat tulis.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum dilakukan proses inversi, langkah utama dalam permodelan adalah dilakukan analisis dimensionalitas guna memperjelas apakah struktur resistivitas bawah permukaan 3D atau 2D. Dalam penelitian ini digunakan analisis dimensionalitas yang dikemukakan oleh metode Swift [2] dan Zhang [3]. Adapun parameter masukan yang diperlukan adalah: jumlah frekuensi, jumlah stasiun, jumlah frekuensi rata-rata, jumlah stasiun rata-rata, dan batas/tingkat kesalahan (*error floor*).

Berdasarkan hasil analisis dimensionalitas data MT seperti dalam gambar 4, Swift's skew rata-rata bernilai kurang dari 0.1, diasumsikan daerah titik ini memberikan informasi 2D. Tetapi ada sebagian titik (titik 1) pada lintasan tersebut nilai Swift's skew ada yang bernilai lebih dari 0.1 yaitu pada frekuensi paling tinggi dan pada titik 2 frekuensi rendah, diasumsikan daerah ini memberikan informasi 3D atau noise. Selanjutnya, Lintasan D, Swift's skew rata-rata bernilai kurang dari 0.1, diasumsikan daerah titik ini memberikan informasi 2D. Tetapi ada sebagian titik (titik 4) pada lintasan tersebut nilai Swift's skew ada yang bernilai lebih dari 0.1 yaitu pada frekuensi rendah ke frekuensi yang tinggi, dapat diasumsikan daerah titik 4 tersebut memberikan informasi 3D atau noise dan begitu juga dengan titik 7 pada frekuensi rendah.

Berdasarkan hasil analisis dimensionalitas data MT (gambar 5) struktur arah strike yang memiliki sudut  $0^\circ$  atau  $90^\circ$  ditunjukkan pada titik 4, 5, dan 6 (frekuensi 0.86-300 Hz) struktur arah strike regional memberikan informasi arah struktur 2D, pada titik 1 dan 2 (frekuensi di atas 270 Hz) juga memberikan informasi arah struktur 2D. Sedangkan pada titik 1, 2 dan 3 (frekuensi 0.86-175 Hz), titik 5 dan 6 (frekuensi disekitar 300 Hz) dianggap sebagai struktur 3D regional. Selanjutnya, Lintasan D struktur arah strike yang memiliki sudut  $0^\circ$  atau  $90^\circ$  ditunjukkan pada titik 1 dan 2

(frekuensi 0.86-200 Hz) struktur arah strike regional memberikan informasi arah struktur 2D. Kemudian pada titik 3, 4 dan 5 (frekuensi 100-320 Hz) juga struktur arah strike regional memberikan informasi arah struktur 2D. Sedangkan pada titik 1 dan 2 (frekuensi 200-320 Hz), pada titik 3, 4 dan 5 (frekuensi 0.86-100 Hz) dan titik 6, 7 dan 8 (frekuensi 0.86-320 Hz) dapat dianggap struktur 3D.

Berdasarkan analisa tersebut dapat diinterpretasikan bahwa, struktur resistivitas bawah permukaan rata-rata 2D (2-dimensi), seperti pada Swift's skew memiliki nilai rata-rata kurang dari 0.1 dan struktur arah strike rata-rata memiliki sudut  $0^\circ$  atau  $90^\circ$ . Oleh karena itu, analisis dimensionalitas data magnetotelurik yang dilakukan telah sesuai dengan lintasan pengukuran. Sehingga tidak harus dilakukan rotasi data dan langkah selanjutnya adalah dilakukan permodelan 2D data MT. Algoritma inversi 2D yang digunakan dalam penelitian ini dikembangkan oleh Lee<sup>5</sup>, dengan nama program *MT2DInvMatlab*. *MT2DInvMatlab* merupakan seperangkat *software* Matlab berbasis *open-source* untuk inversi 2D data magnetotelurik.

Resistivitas semu data pengukuran (gambar 6a) dan perhitungan (gambar 6b) mode-TE dan mode-TM secara umum ada dua zona vertikal, yaitu zona konduktif dan zona resistif. Untuk jarak 0-60 km didominasi oleh zona konduktif yaitu pada frekuensi yang paling rendah sampai frekuensi yang paling tinggi (0.86-320 Hz). Sedangkan untuk jarak 6-140 km didominasi oleh zona yang resistif. Kemudian untuk jarak 140-160 km kembali didominasi oleh zona konduktif.

Demikian juga dengan fase data pengukuran (gambar 6a) dan perhitungan (gambar 6b), yaitu di atas  $45^\circ$  (yang berwarna merah) adalah zona konduktif dan di bawah  $45^\circ$  (yang berwarna hijau) adalah zona resistif. Untuk jarak 0-40 km didominasi oleh zona konduktif yaitu pada frekuensi 0.86-320 Hz. Sedangkan untuk jarak 40-80 km didominasi oleh zona yang resistif. Kemudian untuk jarak 80-160 km

kembali didominasi oleh zona konduktif kecuali pada frekuensi rendah didominasi oleh zona resistif. Fase pengukuran sangat mirip dengan resistivitas semu pengukuran dan resistivitas semu pengukuran sangat mirip dengan resistivitas semu perhitungan demikian juga dengan fase pengukuran sangat mirip dengan fase perhitungan. Kemiripan dari data pengukuran dan perhitungan ini menghasilkan model inversi 2D yang bagus seperti dalam gambar 7.

Dalam inversi model 2D data magnetotelurik dilakukan 10 kali iterasi dengan  $RMS=0.13$ . Proses hasil inversi 2D pada mode-TE+TM (gambar 7) menunjukkan bahwa dari model inversi 2D sangat cocok dengan model pengukuran dan perhitungan. Pada jarak 0 km sampai jarak 40 km didominasi oleh zona konduktif yaitu pada kedalaman hingga 400 meter diduga pada daerah ini dipengaruhi oleh salinitas air laut. Kemudian dari jarak 60 km sampai disekitar jarak 80 km terdapat zona resistif hingga pada kedalaman 1 km.

Selanjutnya di stasiun di sekitar jarak 160 km kembali didominasi oleh zona konduktif hingga kedalaman 400 meter diduga pada daerah ini juga dipengaruhi oleh salinitas air laut. Kontras resistivitas bawah permukaan sangat jelas diantara titik D4 dan D5, yaitu disekitar jarak 60 km. Model inversi 2D data magnetotelurik sangat konsisten dengan struktur geologi, diduga pada titik tersebut adalah Patahan Sumatera (gambar 7).

## KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisis dimensionalitas data magnetotelurik (MT) bahwa Swift's skew pada lintasan C dan D rata-rata bernilai di bawah 0.1 yang artinya pada analisis dimensionalitas ini memberikan informasi 2D. Sedangkan untuk arah struktur strike pada lintasan C dan D rata-rata memiliki sudut  $0^\circ$  atau  $90^\circ$ , dapat diasumsikan bahwa arah strike merupakan struktur 2D dari struktur patahan regional.

2. Berdasarkan data pengukuran yang diperoleh di lapangan bahwa nilai resistivitas semu dan fase pada lintasan D di jarak 0-60 Km ditemukan zona konduktif, selanjutnya di jarak 60-140 Km ditemukan zona resistif dan masing-masing berada pada frekuensi 0,86-320 Hz. Kemudian pada jarak 140 dan 160 Km kembali ditemukan zona konduktif kecuali pada frekuensi rendah. Begitu juga dengan fase data pengukuran mirip dengan resistivitas semu data pengukuran.
3. Berdasarkan model inversi 2D mode-TE dan TM di sepanjang lintasan D, didapatkan struktur resistivitas bawah permukaan konsisten dengan struktur geologi patahan, yaitu diantara titik D4 dan D5. Pada titik D4 dan D5 tersebut ada perbedaan nilai resistivitas batuan bawah permukaan. Oleh karena itu, dapat ditafsirkan bahwa pada daerah tersebut diduga sebagai Sesar Sumatera.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih tak terhingga kepada Bapak Dr. Nurhasan ITB, yang telah memfasilitasi penelitian ini berdasarkan bantuan penelitian dari Dirjen Dikti dengan Skim Kerjasama Luar Negeri Publikasi Internasional tahun 2012. Selain itu

ucapan terimakasih juga disampaikan kepada saudara Dedy Anshar R, Masykur Rizal dan semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Bahr, K. (1991), Geological noises in magnetotelluric data – a classification of distortion types, *Phys. Earth Planet Inter.*, 66, 24 – 28.
2. Swift, C. M., (1976), A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the south-western United States, Ph.D. *Dissertation*, Mass. Inst. Tech., Cambridge, Mass.
3. Zhang P., Roberts, R. G., Pedersen, L. B., (1987). Magnetotelluric strike rules, *Geophysics*, 52, 267-278.
4. Ward S.H., Hohmann, G.W., (1991). Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1 – Theory*, (Ed. Nabighian, M. N.) SEG *Investigations in geophysics*, 3. 131-311.
5. Lee, S.K., H.J. Kim, Y. Song and C.-K. Lee, (2009). MT2DInvMatlab - A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion, *Computers and Geosciences*, 35, 1722-1734.