

PEMODELAN 2-D METODE MAGNETOTELURIK DENGAN MENGAPLIKASIKAN ALGORITMA BICONJUGATE GRADIENT STABILIZED

Muhammad Zukir*

Program Studi Avionika Fakultas Teknik
Universitas Nurtanio Bandung

Jl. Pajajaran No.219 Lanud Husein Sastranegara Bandung 40174

Email: zukir.m1@gmail.com

ABSTRAK

Metoda magnetotelurik adalah salah satu bentuk metode geofisika berupa teknik eksplorasi pasif karena memanfaatkan sumber alami untuk memperoleh variasi dari medan listrik dan medan magnet di permukaan bumi. Rentang frekuensi yang digunakan pada penelitian ini antara 10^{-4} Hz sampai 10^2 Hz. Forward modelling 2D dari metode magnetotelurik bertujuan untuk menentukan nilai dari resistivitas semu dan fasa dari kondisi bawah permukaan bumi dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik. Parameter fisika yang digunakan adalah persamaan Maxwell. Persamaan ini akan digunakan pada kasus polarisasi Transverse Electric (TE) dan polarisasi Transverse Magnetic (TM). Diskritisasi elemen menggunakan finite element dengan metoda Galerkin. Preconditioner yang dimanfaatkan adalah Incomplete Lower – Upper (ILU) yang digabungkan dengan Biconjugate Gradient Stabilized (BiCGStab). Metoda ini bisa menghemat proses iterasi dan menghasilkan grafik fasa, resistivitas semu, dan peluruhan medan listrik dan medan magnet dengan lebih presisi sehingga mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

Kata Kunci : BiCGStab, Forward modelling, Finite element, ILU, , MT

ABSTRACT

Magnetotelluric is a method in passive geophysical exploration techniques as utilizing natural resources. The frequency range used in this research is 10^{-4} Hz to 10^2 Hz. This modelling focus on two Dimension magnetotelluric that aims to show the magitude of apparent resistivity, impedance phase, and electromagnetic field. Physical parameters used are Maxwell's equations. These equations will be used in the case of Transverse Electric (TE) polarization and Transverse Magnetic (TM) polarization. Element discretization used is the finite element method, preconditioner used is Incomplete Lower – Upper (ILU), method used is Biconjugate Gradient Stabilized (BiCGStab) beacuse it can minimize the process of iterations effectively.

Keywords: BiCGStab, Forward modelling, Finite element, ILU, , Magnetotelluric

Pendahuluan

Metoda magnetotelurik (MT) merupakan salah satu metoda eksplorasi geofisika yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam seperti *solar wind* dan *lightning activity*. Metoda ini memiliki spektrum lebar dari variasi geomagnetik yang dihasilkan oleh induksi magnetik dari arus listrik antara ionofer dan magnet bumi serta aktivitas badai listrik dalam atmosfer. Kelebihan dari metode MT dapat digunakan untuk menentukan sifat listrik dari bahan (batuan) yang ada di bawah permukaan bumi pada kedalaman yang relatif besar (termasuk mantel). MT menerapkan formulasi matematika yang ditemukan oleh Gauss (1839). Formulasi ini bertujuan untuk memisahkan antara medan magnet yang berasal dari bawah permukaan bumi dengan medan yang berasal dari luar.

Due to easier implementation of finite difference in comparison with the finite element and integral equation methods, we have opted for the finite difference numerical method (FDM) in the present study^[4]. Hal inilah yang mendasari penulis untuk melakukan forward modelling 2D MT. Penulis mencoba membandingkan tingkat error dengan menggunakan metoda BiCGStab dengan *preconditioner ILU* dengan metoda *Bi-Conjugate Gradient Square* (BiCG) dengan preconditioner Low-Upper (LU).

Gelombang Elektromagnetik (EM)

Semua fenomena elektromagnetik dapat dipecahkan dengan menggunakan persamaan Maxwell^[5]. Sebagaimana berikut:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{4}$$

Persamaan (1) disebut hukum Gauss. Hukum ini menyatakan fluks listrik pada suatu ruang akan sebanding dengan total muatan yang ada dalam ruang tersebut. Persamaan (2.) merupakan hukum induksi Faraday. Hukum ini menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik terhadap waktu mampu menyebabkan terjadinya medan listrik dengan gaya gerak listrik yang berlawanan dengan variasi medan magnet yang menyebabkannya. Persamaan (3) merupakan hukum Gauss untuk kasus magnetism, dimana medan magnet tidak memiliki monopol. Persamaan (4) merupakan Hukum Ampere (ditambah koreksi Maxwell)

Medan elektromagnetik di bumi memiliki beberapa asumsi untuk menyederhanakan analisa. Asumsi yang digunakan adalah medium bersifat isotropis, yaitu medium memiliki besar konduktivitas yang sama untuk semua aliran arus listrik. Sifat-sifat listrik tidak bergantung kepada temperatur dan tekanan..

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \tag{5}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{6}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{7}$$

Jika ditinjau dalam domain frekuensi, maka persamaan bisa dituliskan:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t} \tag{8}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{i\omega t} \tag{9}$$

Dengan melakukan operasi *curl* diperoleh bentuk persamaan Maxwell,

$$\nabla \times \vec{E} = i\mu\omega \vec{H} \tag{10}$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma - i\epsilon\omega) \vec{E} \tag{11}$$

Dengan menggunakan operasi rotasi, sehingga diperoleh persamaan Helmholtz,

$$\nabla^2 \vec{E} + (\omega^2 \mu \epsilon + i\omega \mu \sigma) \vec{E} = 0 \tag{12}$$

$$\nabla^2 \vec{H} + (\omega^2 \mu \epsilon + i\omega \mu \sigma) \vec{H} = 0 \tag{13}$$

$$k^2 = (\omega^2 \mu \epsilon + i\omega \mu \sigma) \tag{14}$$

Skin Depth

Berdasarkan persamaan (12) dan (13) diperoleh,

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \tag{15}$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \tag{16}$$

Pada saat arus konduksi jauh lebih besar dari arus perpindahan ($\sigma \gg \epsilon\omega$), sehingga yang mengandung ϵ bisa diabaikan. Karena pada eksplorasi geofisika frekuensi yang digunakan lebih rendah dari 10 Hz, hal ini mengakibatkan $\omega\mu\sigma \gg \omega\mu\epsilon$. *Skin Depth* (δ) merupakan jarak peluruhan gelombang elektromagnetik yang terinjeksi ke bawah permukaan bumi saat amplitudanya menjadi ϵ^{-1} , sehingga diperoleh:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \tag{17}$$

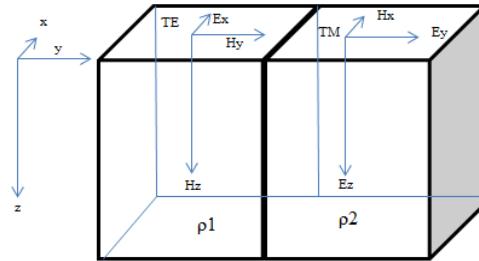
Persamaan (17) terlihat bahwa semakin besar resistivitas dan semakin kecil frekuensi maka kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik akan besar.

Metoda Magnetotelurik Pemodelan 2D

Metoda MT bertujuan untuk menentukan nilai dari resistivitas struktur bawah permukaan dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik^[6]. Berdasarkan frekuensi ini maka sumber medan listrik bisa dibagi menjadi 2 kelompok yaitu, frekuensi rendah ($f < 1$ Hz) dan frekuensi tinggi ($f > 1$ Hz).

Pada model 2D konduktivitas bervariasi sepanjang sumbu z dan salah satu dari sumbu horizontal baik sumbu x atau sumbu y, yang tegak lurus dengan strike. Medan magnetotelluric terbagi menjadi dua modus, yaitu: (1) Modus TM (*Transverse Magnetic*), dan (2) modus TE (*Transverse Electric*). Modus TM dan TE pada umumnya dikenali dengan polarisasi H (medan magnet yang dipolarisasi sepanjang model *strike*) dan polarisasi E (medan listrik

yang terpolarisasi sepanjang model *strike*).



Gambar 1. Struktur polarisasi TE dan TM.

Untuk kasus 2D, perumusan diawali dengan persamaan Helmholtz, sehingga,

1. Modus TM

Dimana, $\vec{H}_y = 0$ dan $\vec{H}_z = 0$.

Sehingga,

$$\vec{E}_y = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} \tag{18}$$

$$\vec{E}_z = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \tag{19}$$

2. Modus TE

Dimana, $\vec{E}_y = 0$ dan $\vec{E}_z = 0$. Sehingga,

$$\vec{H}_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} \tag{20}$$

$$\vec{H}_z = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} \tag{21}$$

Tensor impedansinya bisa dirumuskan melalui tensor impedansi,

$$\vec{E} = \vec{Z}\vec{H} \tag{22}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{Z}_{xx} & \vec{Z}_{xy} \\ \vec{Z}_{yx} & \vec{Z}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{H}_x \\ \vec{H}_y \end{bmatrix} \tag{23}$$

Hubungan impedansi antar komponen yaitu:

$$\vec{Z}_{xy} \neq -\vec{Z}_{yx} \tag{24}$$

$$\vec{Z}_{xx} = -\vec{Z}_{yy} = 0 \tag{25}$$

Maka dapat dirumuskan resistivitas semu (ρ_a) dan fasa impedansi (ϕ),

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} \right|^2 \tag{26}$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{\vec{E}_y}{\vec{H}_x} \right|^2 \tag{27}$$

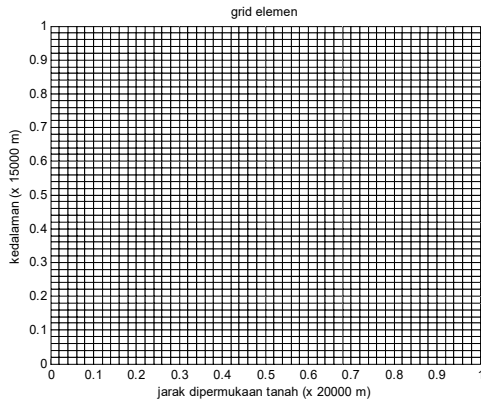
Fasa untuk kasus ini akan menjadi,

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} |Z_{xy}| = \tan^{-1} \left| \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} \right| \tag{28}$$

$$\phi_{yx} = \tan^{-1} |Z_{yx}| = \tan^{-1} \left| \frac{\bar{E}_y}{\bar{H}_x} \right| \quad (29)$$

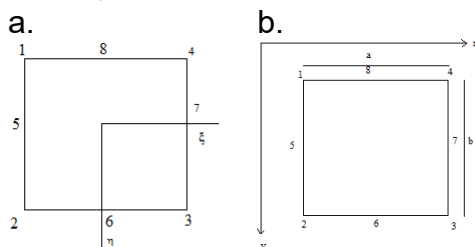
Finite Element

Grid dalam elemen ini menggunakan elemen berupa persegi dengan ukuran lebar dan kedalaman seperti gambar 2 berikut,



Gambar 2. Grid elemen (kedalaman 15000 m dan lebar 20000 m)

Unit interpolasi kuadrat ganda bertujuan mengambil delapan poin di setiap unit Seperti pada gambar berikut [3],



Gambar 3. Element kotak dari interpolasi kuadrat.

Berdasarkan gambar 3 di atas maka dapat dirumuskan persamaan, $x = x_0 + \frac{a}{2}\xi$, $y = y_0 + \frac{b}{2}\eta$ (30)

Dimana, x_0 , y_0 adalah titik tengah sub-unit. Hubungan diferensial antara dua unit adalah:

$$dx = \frac{a}{2}\xi, \quad dy = \frac{b}{2}\eta, \quad dxdy = \frac{ab}{4} d\xi d\eta \quad (31)$$

Struktur bentuk fungsinya adalah,

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \\ N_5 &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1-\xi) \\ N_6 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \\ N_7 &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi) \\ N_8 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \end{aligned}$$

Integrasi elemen,

$$\int_e \frac{1}{2} \tau (\nabla u)^2 d\Omega = \frac{1}{2} u_e^T K_{1e} u_e \quad (32)$$

Dengan, $K_{1e} = (k_{ij})$, $k_{ij} = k_{ji}$

$$k_{ij} = \int_e \tau \left[\begin{aligned} &\left(\frac{dN_i}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} \right) \left(\frac{dN_j}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} \right) \\ &+ \left(\frac{dN_i}{d\eta} \frac{d\eta}{dy} \right) \left(\frac{dN_j}{d\eta} \frac{d\eta}{dy} \right) \end{aligned} \right] \frac{ab}{4} d\xi d\eta$$

Persamaan integralnya,

$$\int_e \frac{1}{2} \tau u^2 d\Omega = \frac{1}{2} u_e^T (k_{ij}) u_e = \frac{1}{2} u_e^T K_{2e} u_e \quad (33)$$

Dengan, $K_{2e} = (k_{ij})$, $k_{ij} = k_{ji}$

$$k_{ij} = \int_e \lambda N_i N_j \frac{ab}{4} d\xi d\eta \quad (34)$$

Persamaan integralnya,

$$\int_{ij} \frac{1}{2} \tau k u^2 d\Gamma = \frac{1}{2} u_e^T (k_{ij}) u_e = \frac{1}{2} u_e^T K_{3e} u_e \quad (35)$$

Matrik K_{1e} , K_{2e} , dan K_{3e} akan menjadi matrik untuk semua node untuk semua unit. Sehingga bisa dirumuskan dengan persamaan,

$$\begin{aligned} F(u) &= \sum F_e(u) = \sum \frac{1}{2} u_e^T (K_{1e} - K_{2e} + K_{3e}) u_e \\ &= \frac{1}{2} u^T \sum K_e u = \frac{1}{2} u^T K u \end{aligned} \quad (36)$$

Maka, $K_e = K_{1e} - K_{2e} + K_{3e}$ $K = \sum K_e$

Berdasarkan persamaan (36), jika perubahannya membuat sama dengan nol, persamaan linearnya adalah,

$$Ku = 0 \quad (37)$$

Dari persamaan diatas bisa diterapkan syarat batas yang diinginkan. Dan dari persamaan ini bisa dicari solusi untuk semua nilai u . Ketika turunan parsial u dihitung nilainya untuk tiap node, kemudian bisa dengan menggunakan metode

numerik untuk mencari nilai sepanjang penampang vertikal $\frac{\partial u}{\partial z}$, dengan mensubstitusikan kedalam formulasi maka bisa dihitung resistivitas semu dan fase impedansi.

Preconditioner ILU

Sebuah faktorisasi *incomplete* mengganti pencarian matrik segitiga *L* dan *U* dengan pendekatan $A \approx LU$ ketimbang $A = LU$. Penyelesaian untuk $LUx = b$ bisa diselesaikan dengan lebih cepat namun tidak menghasilkan solusi yang eksak untuk $Ax = b$. Sehingga, sebagai penggantinya digunakanlah matrik $M = LU$ sebagai preconditioner pada algoritma solusi iterasi yang lain seperti BiCGStab. Pola sparsitas dari *L* dan *U* sering dipilih untuk menjadi sama dengan pola sparsitas dari matrik asli *A*. Sehingga preconditioner ini disebut ILU(0). Error dalam faktorisasi *ILU* dari matrik *A* didefinisikan dengan *E*, sehingga,

$$A = LU + E$$

Preconditioner faktorisasi *ILU* sudah sukses dengan sangat mengejutkan untuk banyak kasus umum yang bersifat non simetrik dan matrik indefinite^[2].

Metoda BiCGStab

BiCGStab adalah metode yang memiliki kemampuan menkonvergenkan dua kali lebih cepat dari BiCG (biconjugate gradient)^[1]. Metoda ini juga mampu menghasilkan error yang lebih kecil.

Misalkan sebuah persamaan matrik dibentuk untuk mendapatkan nilai \vec{H} yang belum diketahui,

$$\vec{E} = \vec{Z}\vec{H} \tag{38}$$

$$r' = \vec{E} - \vec{Z} \cdot r' \tag{39}$$

Sehingga *residual error* bisa didefenisikan sebagai,

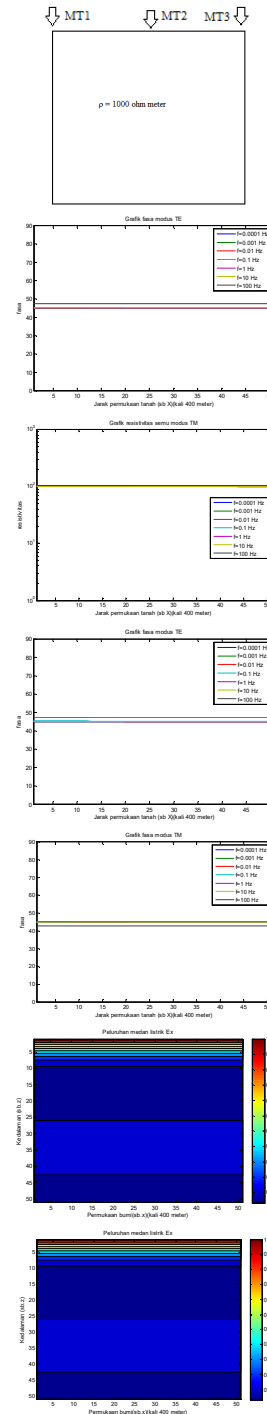
$$Residual\ error = \frac{\|r'\|}{\|Z\|} \tag{40}$$

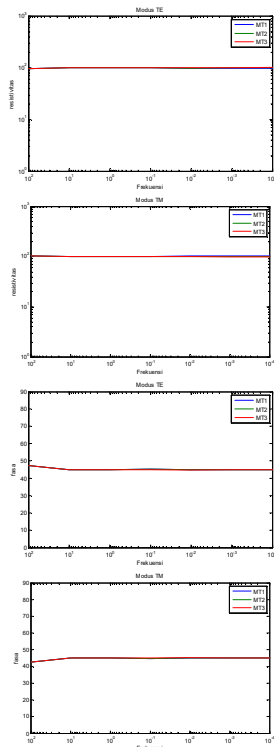
Dimana $\|\bullet\|$ menunjukkan vektor norm. Kriteria berhenti dari metoda BiCGStab dibatasi oleh kesalahan erro minumumr 10^{-15} dalam tulisan ini.

Hasil dan Diskusi

Berikut berbagai kondisi bawah permukaan bumi yang dimodelkan:

1. Pemodelan untuk bumi homogen,





Gambar 4. Hasil Pemodelan untuk bumi homogen

Modus TE dan TM untuk semua frekuensi menunjukkan resistivitas semu 100 ohm meter, untuk frekuensi yang lebih tinggi terlihat error yang cukup mencolok, karena dipengaruhi *skin depth* yang lebih dangkal. Fasa untuk lapisan homogen adalah berkisar 45° untuk semua frekuensi. Peluruhan medan listrik dan medan magnet terlihat bersifat homogen.

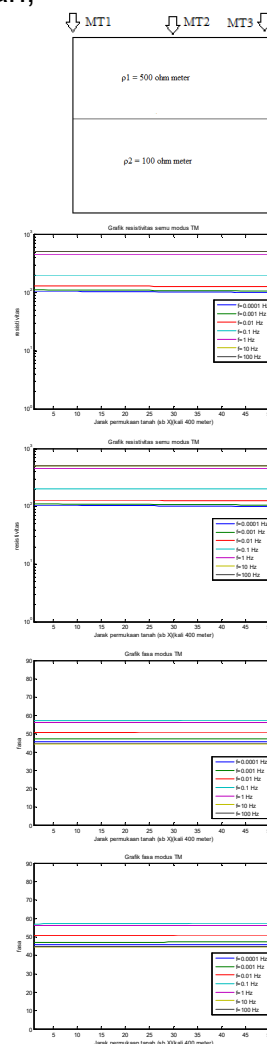
Resistivitas untuk semua frekuensi pada *sounding* MT1, MT2, dan MT3 adalah 100 ohm meter, ini menggambarkan lapisan bumi bersifat homogen. Dan fasa bawah permukaan adalah 45° yang menunjukkan kehomogenan bumi. Sedangkan untuk frekuensi tinggi terlihat adanya pembelokan, kemungkinan penyebabnya adalah *skin depth* yang dangkal, sehingga di pengaruhi oleh *half space*.

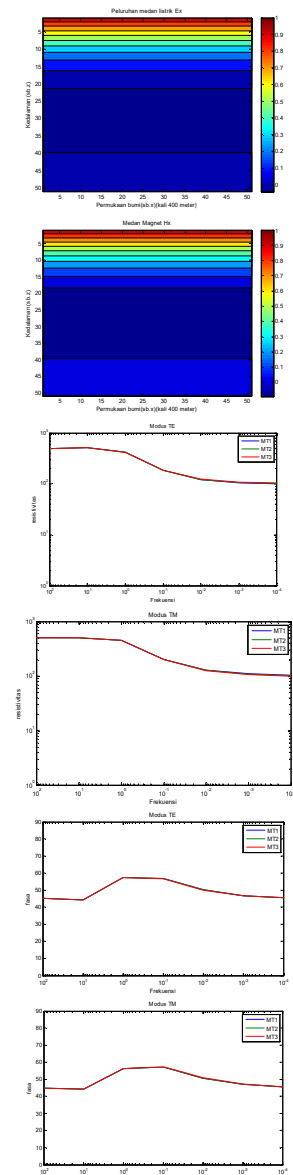
Tabel 1. Perbandingan metode-metode dengan *preconditioner* pada kasus bumi homogen.

Metode	Residual error modus TE min-max	Residual error modus TM min-max
ILU+BiCGStab	6.8×10^{-17} - 4.6×10^{-16}	1.1×10^{-16} - 5.4×10^{-16}
LU+BiCG	3.8×10^{-15} - 9.9×10^{-15}	2×10^{-16} - 5.6×10^{-16}

Tabel 1. di atas memperlihatkan metode BiCGStab dengan *preconditioner* ILU memiliki residual error yang lebih kecil dari metode BiCG dengan *preconditioner* LU.

2. Pemodelan untuk bumi berlapis adalah,





Gambar 5. Hasil Pemodelan untuk bumi berlapis

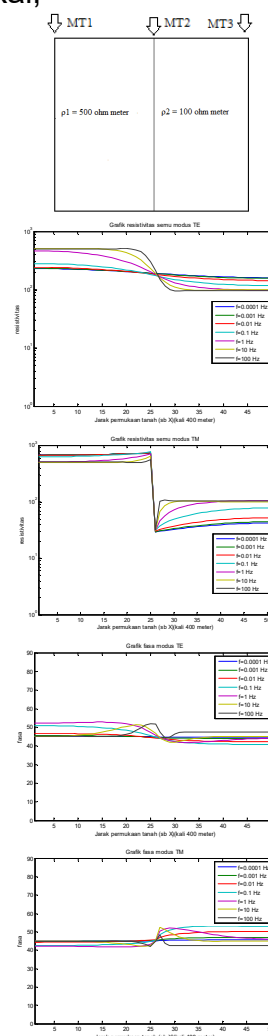
Resistivitas lapisan atas adalah 500 ohm meter dan lapisan bawah 100 ohm meter. Jika dilakukan analisa terlihat bahwa frekuensi yang relatif lebih rendah bisa mendeteksi keberadaan lapisan yang kedua. Sedangkan medan dengan frekuensi tinggi hanya mampu mendeteksi hingga lapisan pertama.

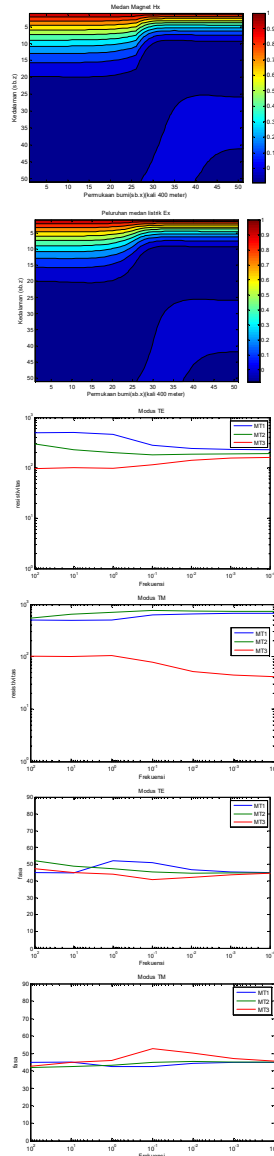
Tabel 2. Perbandingan metode-metode dengan preconditioner pada kasus bumi berlapis ($\rho_1 > \rho_2$)

Metode	Residual error Modus TE min-max	Residual error Modus TM min-max
ILU+BiCGStab	$1.4 \times 10^{-16} - 6 \times 10^{-16}$	$1.5 \times 10^{-16} - 5 \times 10^{-16}$
LU+BiCG	$6.7 \times 10^{-15} - 9.9 \times 10^{-15}$	$2.8 \times 10^{-16} - 6.2 \times 10^{-16}$

Tabel 2. ini menunjukkan bahwa metode BiCGStab dengan preconditioner ILU memiliki residual error yang lebih kecil dari metode BiCG dengan preconditioner LU dan metode CGS untuk modus TE dan modus TM. Tabel ini membuktikan bahwa grafik yang dihasilkan dengan metode BiCGStab dengan preconditioner ILU lebih smooth.

3. Pemodelan untuk bumi kontak vertikal,





Gambar 6. Hasil Pemodelan untuk bumi kontak vertikal

Peluruhan medan magnet dan medan listrik, terlihat bahwa adanya perbedaan warna, pada lapisan dengan resistivitas tinggi terlihat medan magnet dan listrik lebih lambat meluruh dibandingkan lapisan dengan resistivitas rendah. Hal ini dikarenakan pada lapisan dengan resistivitas tinggi lebih cenderung bersifat kapasitif. Resistivitas dan fasa untuk semua frekuensi pada *sounding* MT1, MT2, dan MT3 dipengaruhi oleh nilai dari frekuensi. Hasil pemodelan ini terlihat resistivitas semu dengan permukaan bumi pada

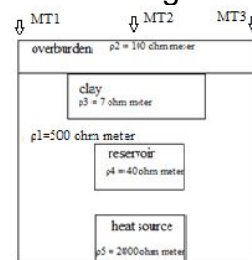
modus TE dan TM, resistivitas berubah dari yang lebih tinggi ke arah yang lebih rendah, grafik ini memberikan gambaran yang jelas tentang lapisan bumi yang berbentuk kontak vertikal.

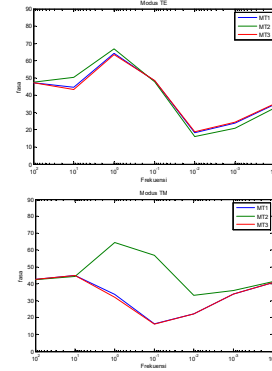
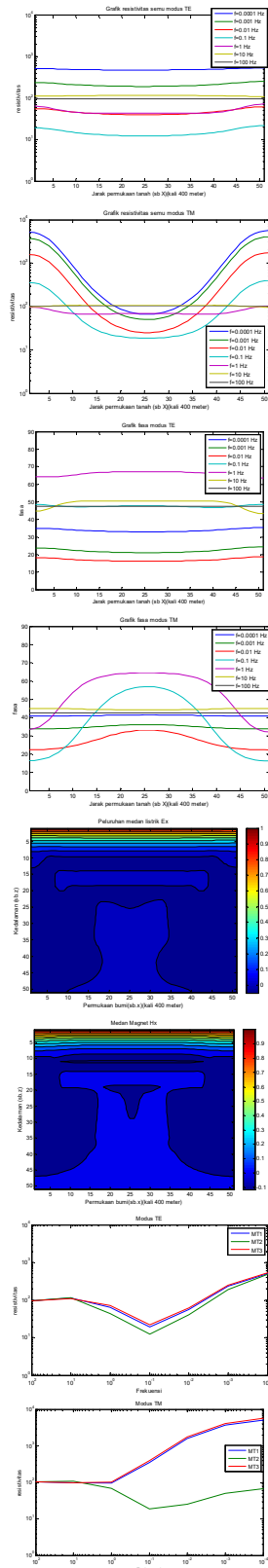
Tabel 3. Perbandingan metode-metode dengan *preconditioner* pada kasus bumi kontak vertikal ($\rho_1 > \rho_2$)

Metode	Residual Error modus TE min-max	Residual Error modus TM min-max
ILU+BiCGStab	1.6×10^{-16} - 4.8×10^{-16}	1.8×10^{-16} - 4.7×10^{-16}
LU+BiCG	4.2×10^{-15} - 8.2×10^{-15}	1.8×10^{-16} - 4.7×10^{-16}

Tabel di atas menunjukkan metode BiCGStab dengan *preconditioner* ILU memiliki residual error yang lebih kecil dari metode BiCG dengan *preconditioner* LU untuk modus TE dan modus TM, sehingga metode BiCGStab dengan *preconditioner* ILU memiliki ketelitian lebih tinggi dan menghasilkan grafik yang lebih *smooth*. Metode CGS memberikan residual eror yang cukup besar dibandingkan dengan metode yang lainnya.

4. Pemodelan untuk bumi untuk salah satu kasus geofisika,





Gambar 8. Hasil Pemodelan pada kasus *heat source*

Salah satu kasus geofisika adalah kasus *Heat source*, yaitu adanya sumber batu panas yang ada dibawah permukaan bumi. pada modus TM terlihat jelas perubahan resistivitas yang cukup signifikan yang menggambarkan adanya sumber panas. Perubahan fasa pada modus TE maupun TM yang menandakan adanya lapisan lain yang ada dibawah permukaan bumi. Peluruhan medan manet dan medan listrik memberikan gambaran yang lebih *real* tentang kondisi bawah permukaan bumi, disini terlihat adanya lapisan *overburden*, lapisan *clay*, *reservoir*, dan *heat source*. Resistivitas dan fasa untuk semua frekusinsi pada *sounding* MT1, MT2, dan MT3.

Tabel 5. Perbandingan metode-metode dengan *preconditioner* pada kasus geofisika.

Metode	Residual Error modus TE min-max	Residual Error modus TM min-max
ILU+BiCGStab	2.6×10^{-16} - 4.2×10^{-16}	2×10^{-16} - 5.6×10^{-16}
LU+BiCG	5.3×10^{-15} - 9.3×10^{-15}	2.7×10^{-16} - 6.1×10^{-65}

Tabel di atas menunjukkan metode BiCGStab dengan *preconditioner* ILU memiliki keakuratan dibanding metode BiCG dengan *preconditioner* LU dengan erornya masih cukup besar. Metoda BiCGStab dengan

preconditioner ILU cukup efektif untuk kasus pemodelan dua dimensi MT.

Penutup

Kesimpulan dari pemodelan 2D magnetotellurik menggunakan *finite element* dengan *preconditioner ILU* dan BiCGStab ini adalah:

- a. Metoda BiCGStab dengan *preconditioner ILU* cukup baik digunakan untuk melakukan pemodelan dibanding dengan metoda BiCG dengan *preconditioner LU*.
- b. Metode *finite element* dengan *preconditioner ILU* dan BiCGStab memberikan hasil respon yang hampir bersesuaian dengan kondisi yang sebenarnya. Respon ini dapat diamati dalam bentuk hubungan resistivitas semu dan fase terhadap jarak, resistivitas dan fase terhadap frekuensi, serta bentuk peluruhan medan magnet dan meda listrik pada berbagai kasus.

Saran untuk kelanjutan tulisan ini adalah supaya para peneliti lain mencoba melakukan pemodelan 3D beserta inversinya dengan *preconditioner ILU* dan metoda BiCGStab.

Referensi

- [1] Babaoğlu, Barış. 2003. *Application of biconjugate Gradient Stabilized Method with Spectral Acceleration for Propagation over terrain Profiles*. Bilkent University.
- [2] Chow, Edmond. 1997. *Experimentaly study of preconditioner for indefinite matrices*. USA: university if Minnesota.
- [3] Jian-xing, LIU. 2009. *Aplication of BICGSTab Algorithm with Incomplete LU Decomposition Precondetioning to Two-Dimentional Magnetotelluric Forward Modelling*. Changsha: Central South University.
- [4] Kumar, Krishna. 2011. *Efficient two-dimensional magnetotellurics modelling using implicitly restarted Lanczos method*. India: Indian Institute of Technology Roorkee.
- [5] Nabighian, M. N. 1981. *Extensions of the magnetometric resistivity (MMR) method*. *Geophysics*.
- [6] Simpson, Fiona. 2005. *Praktical Magnetotellurics*. UK: Cambridge Unversity Press.