

PEMODELAN DATA MAGNETOTELURIK DENGAN *REMOTE REFERENCE* UNTUK EKSPLORASI CEKUNGAN MIGAS

STUDI KASUS: LAPANGAN EM-4

Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu, Bagus Jaya Santosa

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: bjs@physics.its.ac.id

Abstrak— *Pemodelan data magnetotelurik digunakan untuk eksplorasi cekungan migas dengan parameter berupa resistivitas semu dan fase. Data magnetotelurik yang digunakan berupa line JBS4 yang terdiri dari 71 titik pengukuran dan line JBS8 yang terdiri dari 66 titik pengukuran. Data magnetotelurik dilengkapi dengan data remote reference yang digunakan untuk meminimalisir noise sehingga didapatkan data yang lebih baik. Tahapan pengolahan data magnetotelurik dimulai dari seleksi time series, transformasi Fourier, robust processing, seleksi cross power, dan inversi 2 dimensi. Pada hasil penelitian ini didapatkan bahwa metode magnetotelurik dapat menampilkan model bawah permukaan dengan baik. Pada hasil interpretasi terpadu dari hasil inversi magnetotelurik dan data pendukung berupa peta anomali gaya berat, didapatkan model bawah permukaan dan didapatkan dua zona interest pada lapangan EM-4 berupa cekungan Bantarkalong dan cekungan Citanduy dengan sedimen yang cukup tebal dan memiliki nilai resistivitas dominan sebesar 119 Ohm.meter.*

Kata kunci: Magnetotelurik, Frekuensi, Impedansi, Resistivitas.

I. PENDAHULUAN

Energi di Negara Indonesia sudah semakin berkurang. Walaupun sudah mulai dikembangkan energi baru terbarukan, energi minyak dan gas (migas) masih menjadi pilihan utama. Potensi sumber daya migas nasional saat ini masih cukup besar. Terakumulasi dalam 60 cekungan sedimen (basin) yang tersebar di hampir seluruh wilayah Indonesia. Dari 60 cekungan tersebut, 38 cekungan sudah dilakukan kegiatan eksplorasi dan sisanya sama sekali belum dilakukan eksplorasi. Dari cekungan yang telah dieksplorasi, 16 cekungan sudah memproduksi hidrokarbon, 9 cekungan belum diproduksi walaupun telah diketemukan kandungan hidrokarbon, sedangkan 15 cekungan sisanya belum diketemukan kandungan hidrokarbon. Kondisi di atas menunjukkan bahwa peluang kegiatan eksplorasi di Indonesia masih terbuka lebar, terutama dari 22 cekungan yang belum pernah dilakukan kegiatan eksplorasi dan sebagian besar berlokasi di laut dalam (*deep sea*) terutama di Indonesia bagian Timur [4].

Eksplorasi secara masif perlu dilakukan demi mencari cadangan energi migas baru di Indonesia. Eksplorasi memegang peranan penting dalam produksi migas. Dalam dunia eksplorasi migas terdapat beberapa metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui lapisan bawah permukaan. Dalam melakukan eksplorasi cekungan migas, salah satu metode yang bisa digunakan adalah metode magnetotelurik (MT).

Metode MT merupakan metode elektromagnetik pasif yang melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari

kedalaman beberapa meter hingga ratusan kilometer. Penggunaan metode magnetotelurik ini secara umum adalah untuk penelitian panas bumi, minyak dan gas bumi, geohidrologi, geologi regional, batas-batas cekungan dan penelitian-penelitian dalam lainnya yang berkaitan dengan eksplorasi bawah permukaan bumi. Eksplorasi dengan metode MT ini terdiri dari beberapa tahap yaitu tahap akuisisi data, pengolahan data, dan permodelan (inversi) [6].

A. Metode Magnetotelurik

Metode magnetotelurik (MT) merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) alami pada arah yang orthogonal dengan arah permukaan bumi dengan tujuan untuk menentukan konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter [6]. Cakupan rentang frekuensi dari medan elektromagnetik yang bisa direkam oleh metode ini adalah 300-0.001 Hz [3].

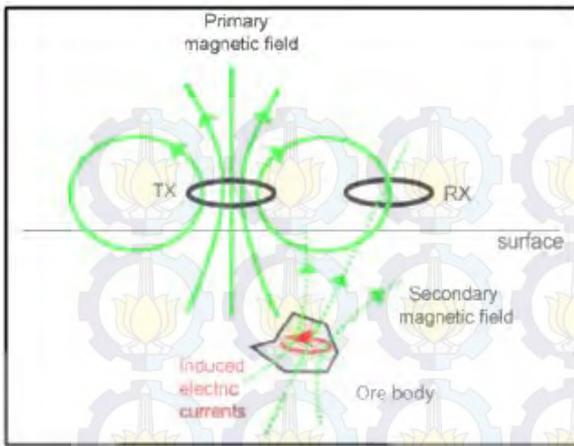
Induksi medan magnet di bawah permukaan bumi dihubungkan dengan medan EM dan resistivitas batuan. Pada umumnya, kebanyakan batuan adalah konduktor yang buruk. Resistivitas batuan tersebut akan besar secara ekstrim jika batuan tersebut bersifat kompak. Hukum Archie, menjelaskan secara empiris untuk mendapatkan nilai resistivitas formasi batuan (ρ),

$$\rho = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w \dots \dots \dots (1)$$

Pada persamaan tersebut, a adalah koefisien yang bergantung pada litologi, m dan n adalah faktor sementasi, ρ_w adalah resistivitas fluida di formasi, ϕ adalah porositas, S_w adalah saturasi fluida [1]. Dapat dilihat pada persamaan (2.1) menunjukkan bahwa nilai resistivitas berbanding terbalik dengan porositas.

Secara singkat proses terjadinya medan listrik dan medan magnetik di permukaan bumi dapat dijelaskan dengan Gambar 2.1.

Dari gambar tersebut dapat dijelaskan pada saat arus dialirkan dari Transmitter TX akan timbul medan magnetik primer maka terjadilah medan elektromagnetik (EM) primer di permukaan bumi. Arus di sini dapat dibuat sendiri atau secara alami. Untuk sumber arus yang alami, digunakan pada metode magnetotelurik. Apabila arus dimatikan kemudian dinyalakan kembali secara berulang, medan magnetik tersebut akan mengalami perubahan. Perubahan medan magnetik ini dikenal sebagai fluks magnet. Jika terdapat benda konduktor atau *ore body* di bawah permukaan bumi, medan magnetik primer ini akan menghasilkan arus listrik akibat adanya induksi arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan dinamakan arus eddy (*Eddy current*). Arus Eddy ini akan menimbulkan medan magnetik sekunder maka terjadilah



Gambar 1. Prinsip Dasar MT [8]

medan elektromagnetik sekunder. Medan listrik (E) dan medan magnetik (B) primer maupun sekunder inilah yang diukur di Receiver RX [8].

Respon medan elektromagnetik pada batuan di bawah permukaan pada kedalaman yang dalam dapat diperoleh dengan menaikkan periode *sounding* elektromagnetik. Prinsip ini sesuai dengan persamaan *electromagnetic skin depth* yang menggambarkan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik ketika berdifusi ke dalam suatu medium:

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \text{ (m)} \dots\dots\dots (2)$$

dimana δ adalah *electromagnetic skin depth*, f adalah frekuensi (keterbalikan dari periode), dan ρ_a adalah *apparent resistivity*. Persamaan di atas menunjukkan bahwa *skin depth* tidak hanya bergantung pada nilai resistivitas batuan di bawah permukaan, melainkan juga bergantung pada periode atau frekuensi alat yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi alat yang digunakan maka akan semakin dangkal penetrasinya. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi alat yang digunakan, maka semakin dalam pula penetrasi yang didapatkan.

Medan elektromagnetik yang menginduksi Bumi secara alami dan digunakan untuk penelitian MT memiliki rentang periode dari 10^{-3} sampai dengan 10^5 detik. Jika diasumsikan resistivitas rata-rata batuan di kerak dan mantel bumi adalah $100 \Omega\text{m}$, maka dengan persamaan di atas didapatkan penetrasi gelombang elektromagnetik mampu mencapai ~ 160 m hingga >500 km. Inilah keuntungan menggunakan metode MT dibanding metode elektromagnetik yang lainnya [6].

B. Tensor Impedansi

Impedansi yang dimaksud pada metode MT ini adalah perbandingan antara medan listrik dan medan magnetik. Pada metode magnetotellurik (MT), salah satu variabel yang dicari yaitu tensor impedansi $Z(\omega)$. Secara umum, hubungan linier antara medan listrik, medan magnetik, dan impedansi dapat dirumuskan dengan persamaan berikut [9]:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i) \left(\frac{\omega\mu}{2\sigma}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

dimana

- E_x = medan listrik pada arah x ($\frac{V}{m}$)
- H_y = medan magnet pada arah y ($\frac{A}{m}$)
- ω = frekuensi angular

μ = Permeabilitas magnetik ($\frac{H}{m}$)

k = bilangan gelombang

Resistivitas semu, ρ_a , untuk lapisan bumi dapat diperoleh dari persamaan (2.4) berikut [2]:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \dots\dots\dots (4)$$

Tensor impedansi, Z merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Oleh karena itu, masing – masing komponen, Z_{ij} dan Z tidak hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki fase [6]

$$\Phi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{Im\{Z_{ij}\}}{Re\{Z_{ij}\}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

C. Akuisisi Magnetotellurik

Untuk merekam gelombang elektromagnetik tersebut maka digunakan dua sensor pada saat akuisisi, yaitu sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus. Cara peletakan sensor elektrik dan sensor magnetik menghasilkan 2 jenis modulus pengukuran [8]:

1. *Transverse Magnetic Mode* (TM)
Mode ini mengukur medan magnet yang **searah** dengan struktur geologi dan medan listrik yang **tegak lurus** dengan arah struktur
2. *Transverse Electric Mode* (TE)
Mode ini mengukur medan magnet yang **tegak lurus** dengan struktur geologi dan medan listrik yang **searah** dengan arah struktur

D. Remote Reference

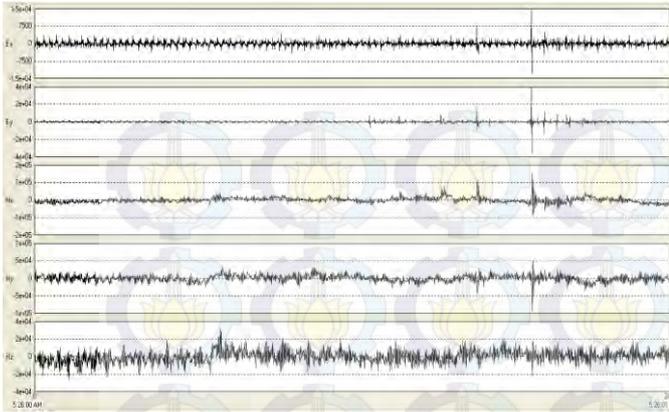
Data yang diperoleh dari pengukuran MT pada umumnya memiliki *noise* lokal yang dapat mengganggu pemodelan maupun interpretasi. Untuk meningkatkan kualitas sinyal yang diinginkan, kita harus memastikan bahwa kombinasi sinyal antara medan listrik dan medan magnetik yang kita dapat adalah kombinasi yang koheren. Pada saat pengukuran MT dilakukan, kita akan memperoleh nilai medan listrik dan medan magnetik dimana ketika sinyal tersebut terekam maka masih terdapat sinyal *noise* yang tidak kita inginkan. Oleh karena itu, *noise* pada data MT ini harus dihilangkan dengan menggunakan metode *remote reference* [8].

II. METODE

Beberapa tahap pengolahan data MT diantaranya adalah, seleksi *time series*, transformasi *Fourier*, *robust processing*, seleksi *cross power*, dan inversi 2D

A. Seleksi Time Series

Pada pemrosesan data MT, terutama yang dilengkapi dengan data *remote reference*, perlu dilakukan seleksi data *time series* dengan cara mencari perpotongan waktu pengukuran yang seolah-olah antara data MT dan data *remote reference* dilakukan pada waktu yang bersamaan.



Gambar 2. Tampilan Time Series

B. Transformasi Fourier

Transformasi *Fourier* merupakan suatu fungsi yang dapat mengubah sinyal dari *time series* menjadi *frequency domain*. *Fourier transform* hanya dapat digunakan untuk *space* atau *time series* yang merupakan fungsi kontinu [6]. Berikut ini adalah fungsi dari *Fourier transform* dengan $x(\omega)$ adalah fungsi gelombang dalam frequency domain, $x(t)$ adalah fungsi gelombang dalam time domain, i adalah bilangan imajiner, $\omega = 2\pi f$ adalah frekuensi angular, dan t adalah waktu.

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt \dots \dots \dots (6)$$

C. Robust Processing

Robust processing adalah teknik pemrosesan statistik yang menggunakan bobot *iterative* dari residual untuk mengidentifikasi dan menghapus data yang menyimpang oleh *noise non-Gaussian*. *Robust processing* menggunakan beberapa pengukuran dari *departure* suatu kontribusi individual dari rata-rata untuk merendahkan bobot *outlier* pada iterasi selanjutnya [6].

D. Seleksi Cross Power

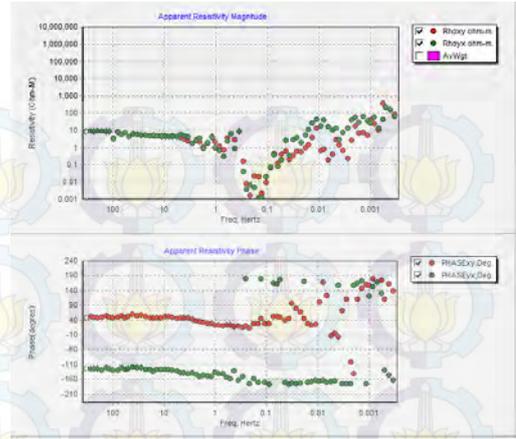
Seleksi *cross power* merupakan tahap yang membutuhkan waktu cukup lama karena pada tahap ini, harus dilakukan seleksi pada tiap titik data MT agar data tersebut memiliki *trend* yang *smooth*. Proses seleksi dilakukan dengan cara menghidupkan dan mematikan data pada grafik *cross power* agar kumpulan data yang dipilih membuat kurva MT dapat terlihat *smooth*. Contoh hasil dari seleksi *cross power* dapat dilihat pada Gambar 3.

E Inversi 2D

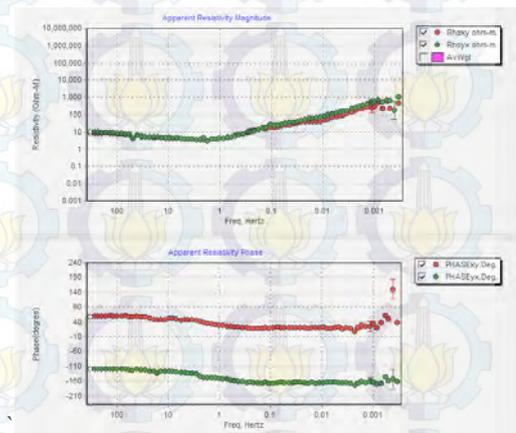
Inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis bawah permukaan. Analisis terhadap data lapangan dilakukan dengan cara melakukan pencocokan kurva antara model matematika dengan data lapangan [7]. Pada penelitian ini digunakan metode inversi Nonlinear Conjugate Gradient (NLCG).

Permasalahan inversi diselesaikan dengan meminimalisir sebuah fungsi objek, S . Fungsi objek berisi jumlah beban *weighted* dari model fungsi objektif dan data *misfit*:

$$S = \Phi_d + \tau \Phi_m \dots \dots \dots (7)$$



(a)



(b)

Gambar 3. Perbandingan Kurva MT (a) sebelum Seleksi (b) sesudah Seleksi

dimana Φ_d adalah data *misfit* dan Φ_m adalah model fungsi objektif. τ adalah parameter regulasi yang mengontrol *trade-off* Φ_d dan Φ_m . τ dipilih agar Φ_d sama dengan nilai konsistensi error data. Nilai τ semakin besar mengindikasikan model cocok dengan data.

Inversi 2D untuk mengatur model fungsi objektif dan data *misfit* sama dengan

$$\Phi_m = \|L(m - m_0)\|^2 \dots \dots \dots (8)$$

$$\Phi_d = (d - F(m))^T R_{dd}^{-1} (d - F(m)) \dots \dots \dots (9)$$

dimana

- L = operator linear
- m = model vektor *unknown*
- m_0 = model awal
- d = vektor data observasi
- $F(m)$ = Operator permodelan *forward*
- R_{dd} = matrik kovarian error

Operator linear yang dipilih adalah Laplacian $L = \Delta$:

$$\|L(m - m_0)\|^2 = \int (\Delta (m_{(x,z)} - m_{0(x,z)}))^2 dx dz \dots (10)$$

Solusi masalah inversi dilakukan dengan iteratif, metode NLCG mengaplikasikan secara langsung minimalisasi dari S . Rangkaian model diberikan oleh:

$$m^{j+1} = m^j + a^{j+1}h^{j+1} \dots \dots \dots (11)$$

dimana h^{j+1} adalah arah pencarian didapatkan dari *NLCG* dan a^{j+1} dihitung untuk meminimumkan *S* dengan *line search*.

Misfit rata-rata antara data prediksi dan data observasi diwakili oleh eror *RMS* (*root mean square*). Eror *RMS* untuk program inversi 2D ditentukan dengan

$$RMS = \sqrt{\frac{(d-F(m))^T R_{dd}^{-1} (d-F(m))}{N}} \dots \dots \dots (12)$$

dimana *N* adalah jumlah titik data [5].

III HASIL DAN PEMBAHASAN

Line JBS4 dan *JBS8* memiliki arah bentangan yang sama yaitu barat daya - timur laut. *Line JBS4* memiliki 71 titik pengukuran dan terbentang sejauh lebih kurang 70.000 meter. *Line JBS8* memiliki 66 titik pengukuran dan terbentang sejauh 65.000 meter.

Untuk hasil inversi dari *line JBS4*, antara *basement* dan lapisan sedimen sudah dapat ditampilkan dengan baik. Keberadaan *basement* ditandai dengan adanya lapisan dengan nilai resistivitas yang tinggi (>200 Ohm.meter). *Basement* memiliki topografi yang bervariasi dan untuk *basement* terdangkal mulai terlihat pada elevasi -2000 meter sedangkan untuk *basement* terdalam berada pada elevasi -4000 meter. Ketebalan sedimentasi juga bervariasi dengan nilai resistivitas yang dominan berkisar 22-119 Ohm.meter.

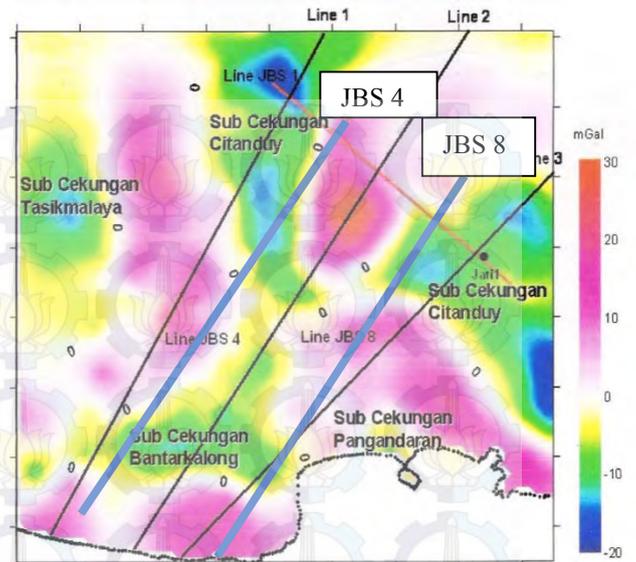
Untuk hasil inversi dari *line JBS8* menunjukkan pola sebaran resistivitas yang tidak jauh berbeda dengan *line JBS4*. Hal ini dikarenakan kedua *line* ini sejajar (membentang pada arah yang hampir sama) sedangkan jarak antara keduanya lebih kurang 35.000 meter. *Basement* yang terlihat dari hasil inversi *line JBS8* juga memiliki topografi yang bervariasi. *Basement* terendah mulai terlihat pada elevasi -2000 meter dan *basement* terdalam pada elevasi lebih kurang -4000. Sedimentasi juga terlihat memiliki ketebalan yang bervariasi dengan nilai resistivitas dominan berkisar 22-119 Ohm.meter.

Pada penelitian ini, digunakan data pendukung untuk meningkatkan keyakinan data MT yang sudah diolah. Data pendukung yang digunakan adalah peta anomali gaya berat residual dari lapangan EM-4, lokasi dimana dilakukannya akuisisi dari data MT pada penelitian ini.

Peta Anomali Gaya Berat di atas menunjukkan nilai gaya berat dari lapangan EM-4. Daerah yang memiliki nilai gaya berat tinggi menunjukkan indikasi adanya tinggian sedangkan untuk nilai gaya berat yang rendah (sampai minus) mengindikasikan adanya rendahan.

Pada Gambar 4, lintasan MT yang digunakan pada penelitian ini ditandai dengan garis berwarna biru tebal dengan keterangan nama *line* yang sudah tertera pada gambar tersebut. Peta anomali gaya berat digunakan untuk membantu dilakukannya interpretasi dari hasil inversi 2D MT yang sudah dilakukan.

Lapangan EM-4 memiliki 4 cekungan yang diketahui berdasarkan peta anomali gaya berat residual. Cekungan tersebut adalah cekungan Tasikmalaya, Cekungan Citanduy, Cekungan Bantarkalong, dan Cekungan Pangandaran. Empat cekungan tersebut ditandai dengan wilayah yang memiliki



Gambar 4. Peta Anomali Gaya Berat Residual pada Lapangan EM-4

nilai gaya berat rendah (satuan mGal). Sedangkan dari lintasan MT, terlihat bahwa lintasan tersebut melewati cekungan Bantarkalong dan Cekungan Pangandaran.

Hasil dari inversi 2D MT telah dapat menampilkan model cekungan yang dilewati oleh *line JBS4* dan *JBS8*. Pada *line JBS4*, cekungan Bantarkalong memiliki sedimentasi yang tebal sampai lebih kurang 4000 meter dan cekungan Citanduy memiliki ketebalan sedimen mencapai lebih kurang 3000 meter. Pada *line JBS8*, cekungan Bantarkalong memiliki sedimentasi dengan tebal mencapai lebih kurang 4000 meter dan untuk cekungan Citanduy memiliki tebal sedimentasi mencapai lebih kurang 3000 meter. Cekungan – cekungan ini memiliki sedimentasi yang cukup tebal dan bisa diasumsikan sebagai zona *interest* untuk dilakukan eksplorasi berikutnya.

Pada hasil inversi 2D MT ini, secara spekulatif dapat digambarkan struktur patahan yang terbentuk berdasarkan *discontinue electricity* atau terputusnya nilai resistivitas pada suatu lapisan (pada gambar 4.16 dan 4.17, patahan digambarkan dengan garis putus-putus). Pada kedua model yang dihasilkan, dapat dilihat bahwa lapisan sedimen yang mengisi cekungan, memiliki nilai resistivitas dominan sekitar 22-119 Ohm.meter.

Interpretasi dari data MT dan Peta Anomali Gaya Berat ini masih berupa dugaan awal dari struktur bawah permukaan dari lapangan EM-4. Untuk melakukan interpretasi lebih mendalam, diperlukan data pendukung yang lain terutama data geologi yang tidak didapatkan pada penelitian ini. Namun secara umum, metode MT telah dapat menggambarkan struktur bawah permukaan dengan baik dengan nilai resistivitas sebagai parameter utamanya dan dari data MT ini pula dapat diidentifikasi zona-zona yang nantinya menjadi target eksplorasi selanjutnya.

IV KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data MT pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metoda MT mampu memetakan struktur geologi serta menampilkan zona *interest* berdasarkan kontras tahanan jenis material bawah permukaan secara baik serta sejalan dengan data pendukung.
2. Pada *line JBS4* dan *JBS8* menampilkan model hasil inversi 2D yang tidak jauh beda satu sama lain

dengan ketebalan sedimen berkisar 4000 meter untuk cekungan Bantarkalong dan 3000 meter untuk cekungan Citanduy

3. Berdasarkan hasil interpretasi hasil inversi 2D data MT dengan peta anomali gaya berat pada lapangan EM-4, diindikasikan adanya sedimentasi yang tebal pada cekungan Bantarkalong dan Citanduy dengan nilai resistivitas sedimen dominan sebesar 22-119 Ohm.meter

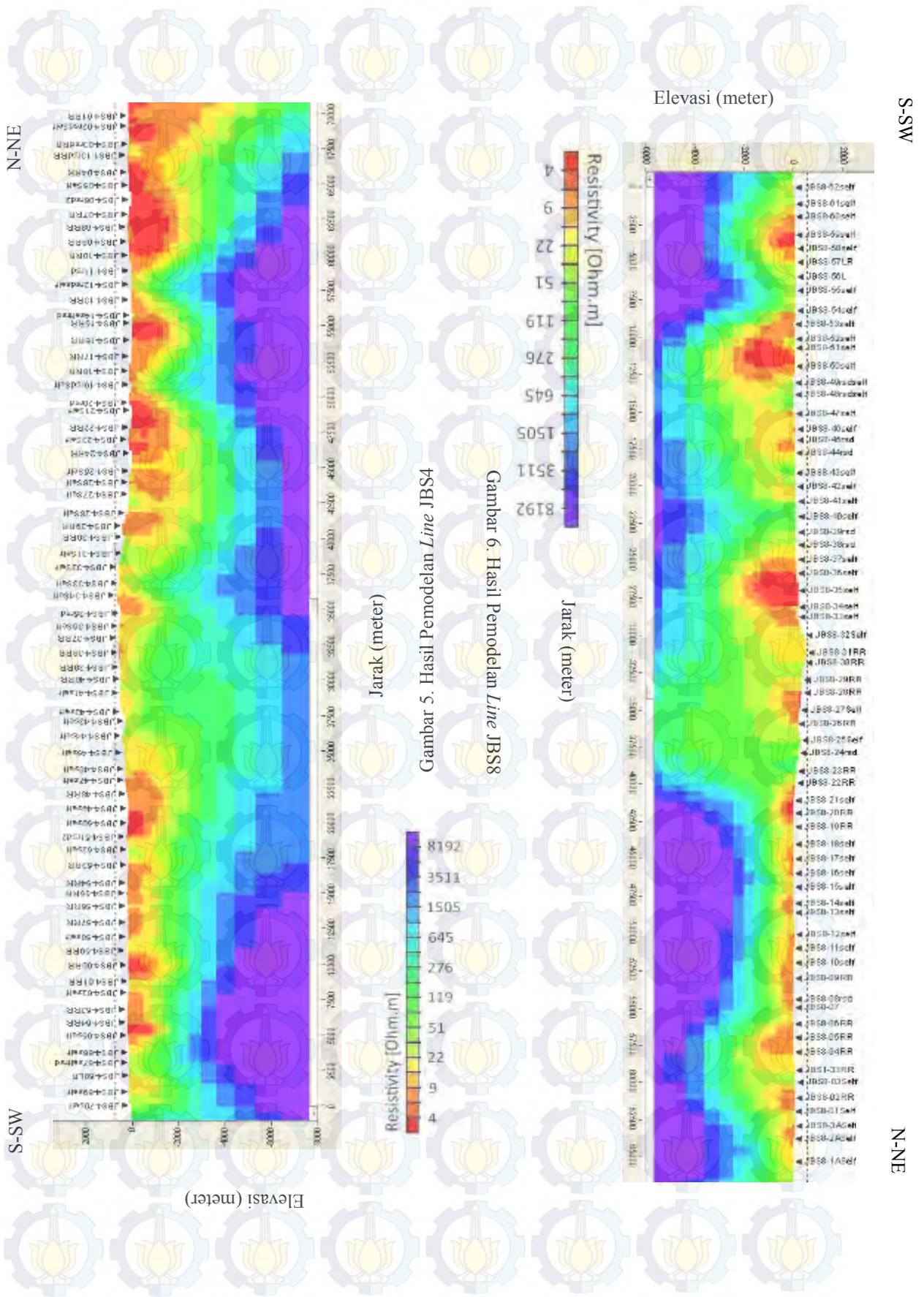
UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pertamina UTC atas terlaksananya penelitian ini, Pak Bagus, Pak Djedi dan Mas Chevy selaku pembimbing, serta rekan-rekan Laboratorium Geofisika Fisika FMIPA ITS.

DAFTAR PUSTAKA

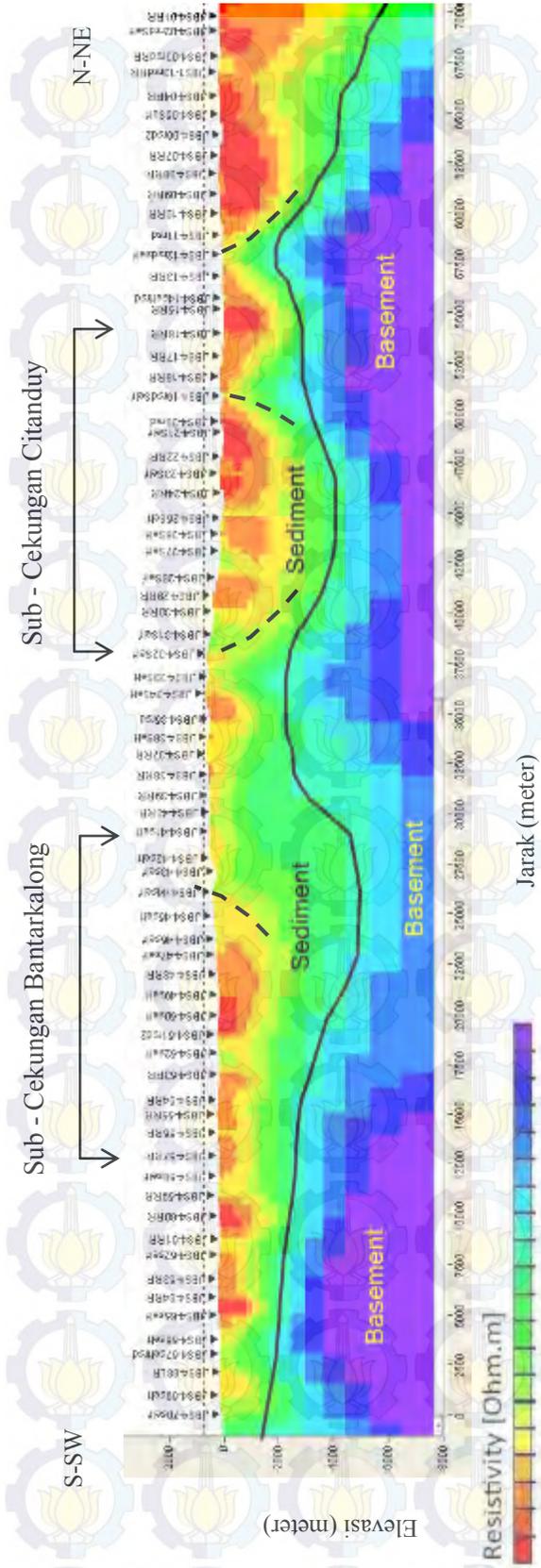
- [1] Bedrosian, P.A, Unsworth, M.J., and Wang, F., 2001. **Structure of The Altyn Tagh Fault and Daxue Shan from Magnetotelluric Surveys: Implications for Faulting Associated With The Rise of The Tibetan Plateau**, Tectonics v. 20, No. 4, p. 474-486.
- [2] Cagniard, L. 1953. **Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting**. Geophysics 18.
- [3] Daud, Y. 2010, **Diktat Kuliah : Metode Magnetotellurik (MT)**. Depok: Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- [4] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2011. **Peluang Investasi Migas di Indonesia**, <URL: <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4586-peluang-investasi-migas-di-indonesia.html>>
- [5] Merindawati, M. 2007. **Pemodelan Data Magnetotelurik Menggunakan Inversi 1 Dimensi Occam dan Inversi 2 Dimensi NLCG**. Depok: Universitas Indonesia
- [6] Simpson, F., & Bahr, K. 2005. **Practical Magnetotellurics**. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [7] Suparno, S. 2007. **Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi**. Departemen Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia.
- [8] Unsworth, M. 2006. **Overview of Electromagnetic Exploration Methods**. Geophysics 424
- [9] Vozoff, K. (1991). **The Magnetotelluric Method, Electromagnetic Method in Applied Geophysics-Application**. SEG.

LAMPIRAN

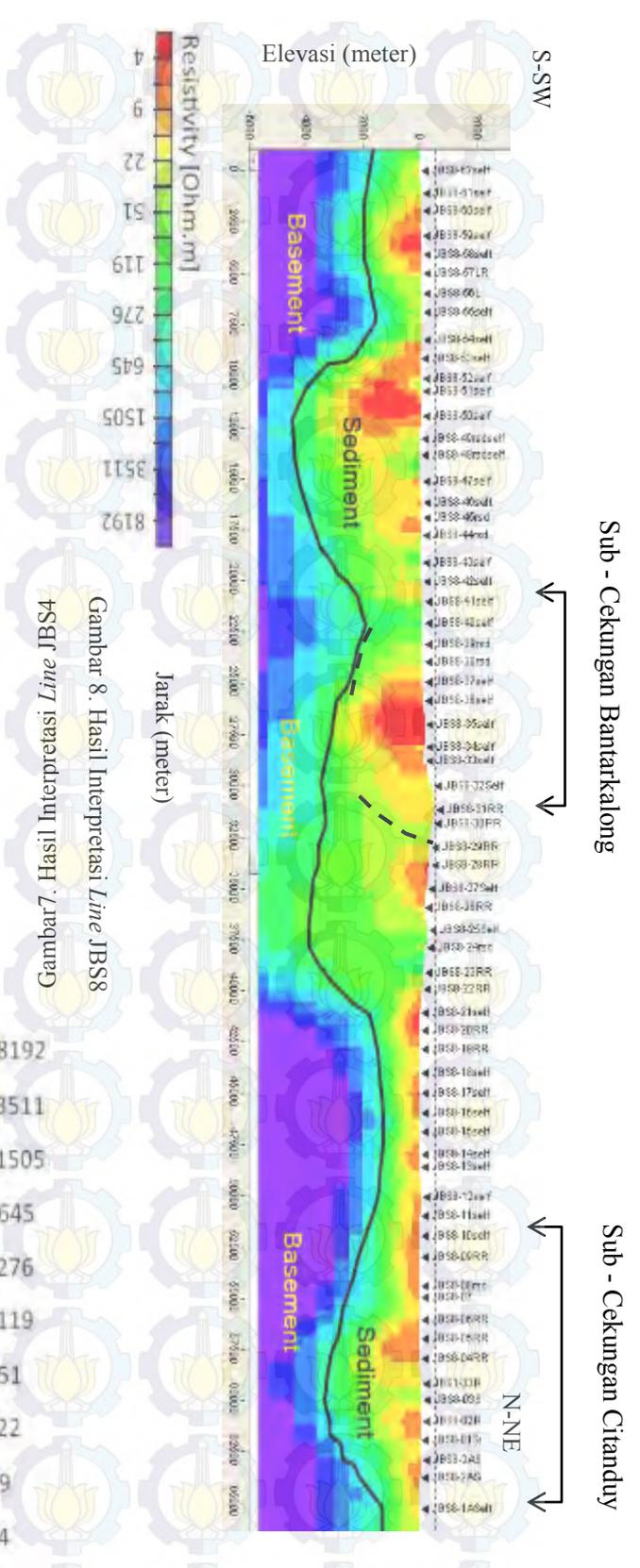


Gambar 5. Hasil Pemodelan Line JBS4

Gambar 6. Hasil Pemodelan Line JBS8



Gambar 7. Hasil Interpretasi Line JBS4



Gambar 8. Hasil Interpretasi Line JBS8