



UNIVERSITAS INDONESIA

**Pemodelan 3D *Cavity* Daerah “X” Dengan Menggunakan Metode
Resistivity Konfigurasi *Dipole-Dipole***

SKRIPSI

PAULUS

0606068562

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**Pemodelan 3D *Cavity* Daerah “X” Dengan Menggunakan Metode
Resistivity Konfigurasi *Dipole-Dipole***

SKRIPSI

diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

PAULUS

0606068562

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Paulus

NPM : 0606068562

Tanda Tangan :

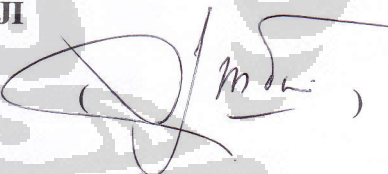

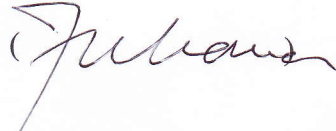
Tanggal : 18 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Paulus
NPM : 0606068562
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Pemetaan *Cavity* 3D Daerah “X” Dengan
Menggunakan Metode Resistivity Konfigurasi
Dipole-Dipole

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Yunus Daud ()
Penguji I : Dr. Supriyanto ()
Penguji II : Dr. Dede Djuhana ()
Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 18 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus karena Berkat dan Anugrah-Nya Penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul pemodelan 3D *cavity* daerah “X” dengan menggunakan metode *resistivity* konfigurasi *dipole-dipole*. Penulisan Penelitian ini sebagai salah satu syarat kelulusan program studi Fisika peminatan geofisika Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Dalam penulisan penelitian ini, Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada orang-orang yang sangat berperan dalam penulisan ini kepada :

1. Bapak Dr. Yunus Daud sebagai Pembimbing yang telah memberikan saran dan nasihat kepada Penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Isom Mudzakir.M.si selaku Pembimbing Akademis Penulis yang telah memberikan nasihat dalam bidang akademis.
3. Staf usaha Departemen Fisika, Mba Ratna dan Mas Mardi atas bantuannya dalam mengurus administrasi pada waktu kuliah terutama saat penyusunan skripsi ini. Mas Heri dan Mas Teja yang telah melayani Penulis dalam peminjaman buku di perpustakaan dan yang telah membantu dalam membantu menginstal laptop penulis.
4. Semua Dosen di Departemen Fisika yang telah mengajarkan disiplin ilmu Fisika kepada Penulis.
5. Tim Laboratorium Geofisika Universitas Indonesia yaitu Mas Budi, Kak Surya (Fisika 2005), Muhammad Harfan (Fisika 2006), Dzil Mulki (Fisika 2007), Igan (Fisika 2007), Andi (Fisika 2007).
6. Anita Hartati dan Iyan Sulisty (Fisika 2007) yang telah membantu dalam data geologi dan pengolahan data.
7. Teman-teman Fisika 2006 (Dionisius, Khari, Rizki Mahmuda, Rotua, Suhendro, Tiara, Yusuf Hadi) yang mengambil penelitian pada semester ini.

8. Amang Tua Hasahatan yang telah membantu dalam membiayai Penulis selama perkuliahan.
9. Namboru Indra yang telah membelikan Laptop, sehingga Penulis dapat mengerjakan skripsi ini.
10. Seluruh Keluarga Tercinta yaitu Inang Tua Meri, Tulang Frans, Abang Gogo, Uda, Amang Boru, Namboru dan Adikku Airlangga Kurniawan.
11. Kedua orang tua Penulis dan My Twins (Debora dan Ruth) yang selalu mendoakan dan memberikan semangat kepada penulis sejak perkuliahan dan dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Para Pendoa Syafaat Penulis yang telah mendoakan Penulis. Keep on with your prayers.

Penulis menyadari bahwa penulisan penelitian ini masih kurang sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat Penulis harapkan.

Depok, 18 Juni 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Paulus
NPM : 0606068562
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pemodelan 3D *Cavity* Daerah “X” Dengan Menggunakan Metode Resistivity
Konfigurasi *Dipole-Dipole***

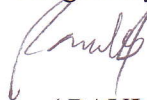
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*data base*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 18 Juni 2012

Yang Menyatakan



(PAULUS)

ABSTRAK

Nama : Paulus
Program Studi : Fisika
Judul : Pemodelan 3D *Cavity* Daerah "X" Dengan Menggunakan Metode *Resistivity* Konfigurasi *Dipole-Dipole*

Metode *resistivity* dapat memberikan gambaran struktur bawah permukaan yang terdapat *cavity*. Berdasarkan kondisi geologi pembentukan *cavity*, daerah prospek "X" ini termasuk dalam sistem sedimen yang didominasi batuan pasir. Pengukuran metode *resistivity* pada tiap lintasan pengukuran menghasilkan perbedaan nilai hasil pengukuran akibat perbedaan sifat fisik batuan. Akuisisi data metode *resistivity* telah dilakukan dengan spasi elektroda 5 meter sebanyak 11 lintasan yang bertujuan untuk mendapatkan *apparent resistivity*. Selanjutnya, untuk mendapatkan *true resistivity* dengan melakukan proses inversi. Pemodelan 2D dan 3D data *resistivity* dengan menggunakan *software* *res2dinv*, *surfer 9*, *res3dinv*, dan *GeoSlicer X* telah memberikan informasi zona *cavity* yang terdapat pada daerah pengukuran sehingga daerah prospek dapat dilokalisasi.

Kata kunci : Cavity, Resistivity, Model 2D dan 3D, Inversi, True Resistivity, Akuisisi Data

ABSTRACT

Name : Paulus
Study Program : Physics
Topic : 3D modeling Cavity Region "X" Method of Using
Dipole-Dipole Resistivity Configurations

Resistivity method can provide a section of the subsurface structure of the cavity contained. Based on the geological conditions of cavity formation, the prospect of "X" is included in the sandstone-dominated sedimentary. Measurement methods of measurement of resistivity in each path leads to different values of measurement results due to differences in physical properties of rocks. Resistivity data acquisition methods have been performed with an electrode spacing of 5 meters by 11 trajectories that aim to obtain apparent resistivity. Furthermore, to obtain the true resistivity is used inversion process. 2D and 3D modeling of data using software res2dinv resistivity, surfer 9, res3dinv, and GeoSlicer X has provided the information contained in the cavity zone measurement area can be localized so that the prospect area.

Keywords : Cavity, Resistivity, 2D and 3D Model, Inversion, True Resistivity, Data Acquisition

DAFTAR ISI

| | |
|--|--|
| HALAMAN JUDUL | |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | |
| LEMBAR PENGESAHAN | |
| KATA PENGANTAR..... | |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH..... | |
| ABSTRAK | |
| ABSTRACT..... | |
| DAFTAR ISI..... | |
| DAFTAR GAMBAR..... | |
| DAFTAR TABEL. | |
| | |
| BAB 1 Pendahuluan..... | |
| 1.1 Latar Belakang..... | |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | |
| 1.3 Batasan Masalah..... | |
| 1.4 Waktu Penelitian | |
| 1.5 Metodologi Penelitian | |
| | |
| BAB II TEORI DASAR..... | |
| 2.1 Metode <i>Resistivity</i> | |
| 2.1.1 Medan Potensial Pada Medium Homogen..... | |
| 2.1.2 Sebuah Elektroda Arus Di Bawah Permukaan..... | |
| 2.1.3 Sumber Arus Tunggal Di Permukaan..... | |
| 2.1.4 Dua sumber Arus Di Permukaan..... | |
| 2.2 Konsep <i>Apparent Resistivity</i> | |
| 2.2.1 Konfigurasi Elektroda..... | |
| 2.2.1.1 Konfigurasi <i>Dipole-Dipole</i> | |
| 2.2.2 Sifat Kelistrikan Batuan | |
| 2.2.2.1 Potential Listrik Batuan..... | |
| 2.2.2.2 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Nilai <i>Resistivity</i> | |
| 2.3 Teori Dasar Inversi..... | |
| 2.4 Teori <i>Cavity/Sinkhole</i> | |

BAB III AKUISISI DATA.....

3.1 Akuisisi Data Metode *Resistivity*.....

3.1.1 Peralatan Pengukuran Di Lapangan

3.1.2 Prosedur pengukuran di lapangan.....

3.2 Desain Survei Pengukuran.....

BAB IV PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengolahan Data *Resistivity*.....

4.1.1 Proses Pra-inversi.....

4.2 Software Res2dinv.....

4.2.1 Hasil Inversi Model 2D *Resistivity* Tiap – Tiap Lintasan...

4.3 Software Res3dinv.....

4.3.1 Model 3D *resistivity* Penampang sumbu XZ.....

4.3.2 Model 3D *resistivity* Penampang sumbu YZ.....

4.4 Software GeoSlicer-X.....

BAB V INTERPRETASI DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Geologi Lokal Daerah Penelitian.....

5.1.1 Geologi Umum Wilayah Bogor.....

5.1.2 Stratigrafi Wilayah Bogor.....

5.1.3 Sejarah Dan Struktur Geologi Regional Bogor.....

5.2 Data Geofisika

5.2.1 Interpretasi Model Inversi 2D Data *Resistivity* Tiap - Tiap Lintasan.....

5.2.1.1 Interpretasi Model 2DLintasan A.....

5.2.1.2 Interpretasi Model 2DLintasan B.....

5.2.1.3 Interpretasi Model 2DLintasan C.....

5.2.1.4 Interpretasi Model 2DLintasan D.....

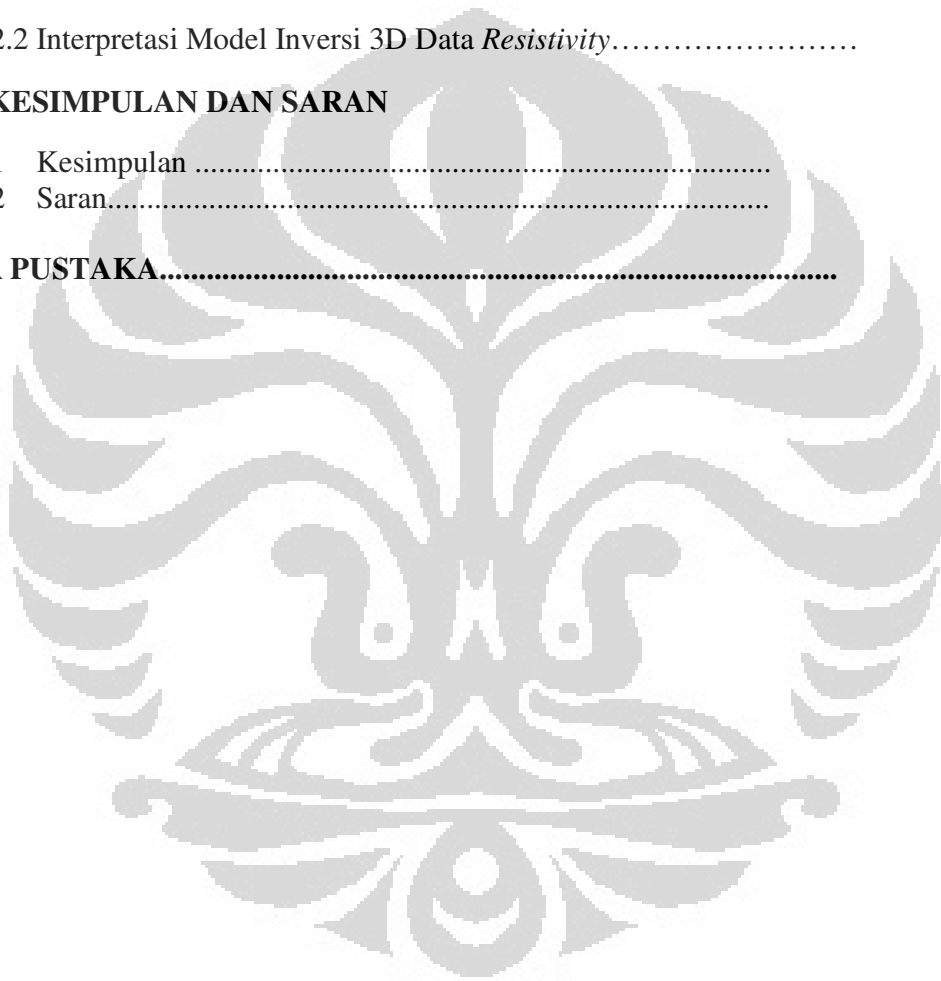
5.2.1.5 Interpretasi Model 2DLintasan E.....

| |
|---|
| 5.2.1.6 Interpretasi Model 2DLintasan F..... |
| 5.2.1.7 Interpretasi Model 2DLintasan G..... |
| 5.2.1.8 Interpretasi Model 2DLintasan H..... |
| 5.2.1.9 Interpretasi Model 2DLintasan I..... |
| 5.2.1.10 Interpretasi Model 2DLintasan J..... |
| 5.2.1.11 Interpretasi Model 2DLintasan K..... |
| 5.2.2 Interpretasi Model Inversi 3D Data <i>Resistivity</i> |

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

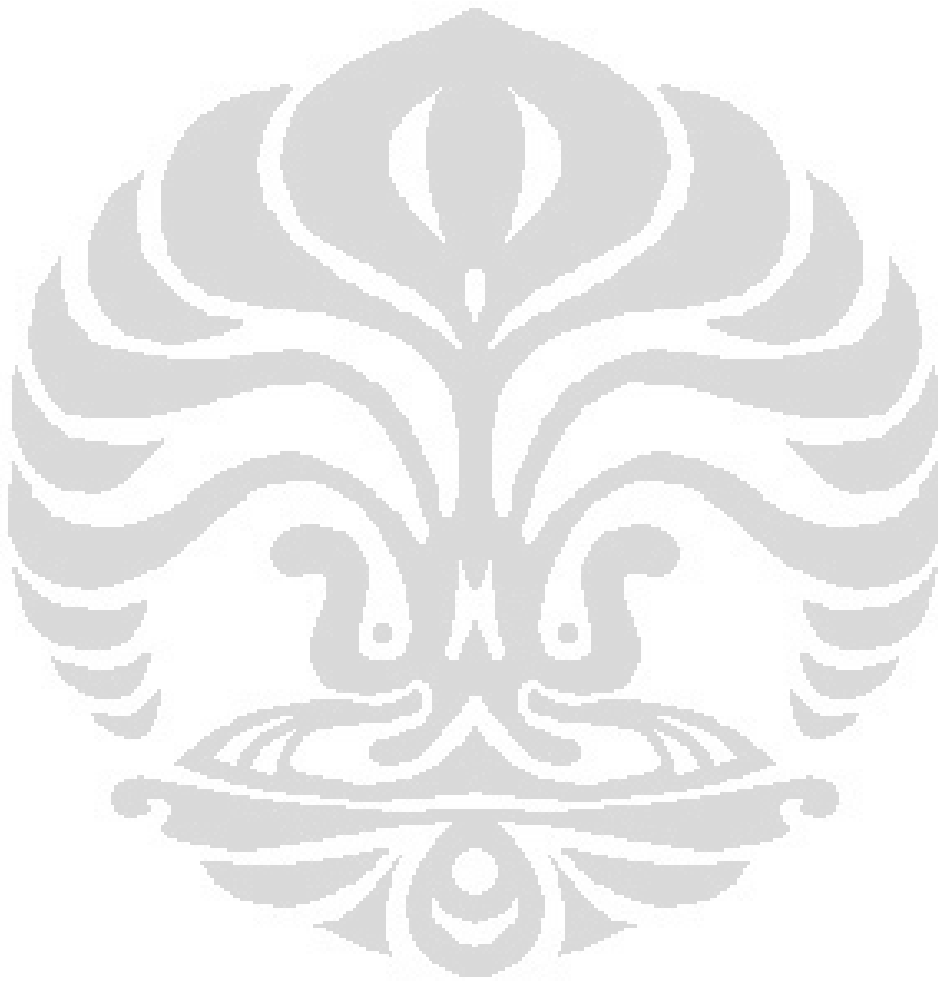
| |
|----------------------|
| 6.1 Kesimpulan |
| 6.2 Saran..... |

DAFTAR PUSTAKA.....



DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 2.1 | Variasi nilai <i>resistivity</i> batuan dan mineral..... | 17 |
|-----------|--|----|



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Pembangunan di JABODETABEK di berbagai sektor meliputi *drainase*, pembangunan jalan raya, transportasi jembatan, perumahan, perkantoran, tempat hiburan, pabrik, dan sarana-sarana lainnya. Berhubungan dengan pembangunan-pembangunan tersebut, sebelum melaksanakan suatu konstruksi bangunan diperlukan informasi kondisi bawah permukaan. Untuk memperoleh informasi tersebut diperlukan metode-metode geofisika seperti metode *resistivity*, gravitasi, *Ground Penetrating Radar*, dan metode-metode geofisika lainnya.

Metode-metode geofisika telah melakukan aplikasi yang luas yaitu dari investigasi struktur tanah pada bangunan sampai pemeriksaan *dams* dan *dike* (Klimis *et al* 1999; Luna dan Jadi 2000; Othman 2005; Savvaidis *et al* 1999; Soupios *et al* 2005,2006; Venkateswara *et al* 2004). Tujuan dari investigasi tersebut adalah memetakan struktur geologi batuan dan menentukan parameter-parameter fisika dari batuan yang terdapat di bawah permukaan. Salah satu permasalahan dalam melakukan konstruksi bangunan adalah mengestimasi terdapatnya *Cavity* di bawah permukaan yang dapat mempengaruhi kualitas dari fondasi suatu bangunan (Vogelaar, 2001). Dalam geofisika teknik, hal mengenai kualitas dari fondasi bangunan sering kali terkait pada saat terjadinya gempa bumi (Delgado *et al.*, 2000a, 2000b,2002; Seht Malte Ibs-Von dan Wohlenberg, 1999; Parolai *et al.*, 2001, 2002). Pada kasus konstruksi bangunan, metode-metode geofisika dapat diaplikasikan untuk menyediakan informasi yang berguna mengenai kondisi di bawah permukaan yang berbahaya sebelum dilakukan konstruksi bangunan (Soupios *et al.*, 2007). Informasi ini sangat diperlukan karena untuk mencegah situasi yang berbahaya saat dilakukannya pembangunan misalnya terjadinya *subsidence*.

Hal-hal yang dapat ditimbulkan akibat keberadaan *cavity* yaitu mengenai masalah lingkungan, militer dan teknik sipil. Masalah lingkungan yaitu kesulitan dalam melokalisasi konstruksi serta kontaminasi air tanah dan daerah *subsidence* yang diakibatkan pengambilan air bawah tanah. Sedangkan, pada teknik sipil keberadaan objek terkubur dibawah permukaan menjadi prioritas yang sangat penting (Habberjam,1969).

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode *resistivity* untuk memetakan *cavity* yang terdapat di bawah permukaan. Metode *resistivity* adalah salah satu metode geofisika yang efektif untuk memetakan *cavity* di bawah permukaan (Van Schoor, 2002). Pada kasus-kasus sebelumnya metode ini sudah sangat sering diaplikasikan dan terbukti bahwa metode ini telah berhasil melokalisasi keberadaan *cavity* di bawah permukaan. sebagai contoh, Panno *et al* menggunakan metode *resistivity* untuk mengidentifikasi *cavity* pada *overburden* yang terbentuk di atas batuan dasar. Selanjutnya, Peangta *et al* menggunakan metode ini untuk memetakan *cavity* yang *collapse* sehingga terbentuk menjadi *sinkhole*. Metode *resistivity* sering digunakan untuk mendeteksi *cavity* karena resistansi listrik *cavity* lebih besar dibandingkan daerah sekitarnya (Smith, 1986; Ushijiima *et al.*, 1989; Noel and Xu, 1992; Manzanilla *et al.*, 1994; Elwadi *et al.*, 2001).

Pada metode *resistivity* terdapat beberapa konfigurasi yang dapat digunakan dalam pengukuran di lapangan. Konfigurasi yang digunakan pada penelitian ini adalah konfigurasi *dipole-dipole*. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa konfigurasi *dipole-dipole* memiliki resolusi yang bagus untuk memetakan keberadaan *epikarstal fracture* dan gua (Roth *et al*, 1999; Labuda dan Baxter, 2001). Penelitian ini bertujuan memetakan *cavity* di bawah permukaan yang terkait dengan konstruksi bangunan.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan :

- Memahami cara pengambilan data survei *resistivity* dengan baik di lapangan secara langsung.
- Memahami tahapan pengolahan data *resistivity* dan pemodelan 2D dan 3D serta menginterpretasi secara baik dan benar.
- Melokalisasi kedalaman dan nilai *resistivity cavity* yang terdapat di bawah permukaan.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan metode *resistivity dipole-dipole* dengan jarak antara elektroda 5 meter pada setiap lintasan kecuali pada lintasan J dan K dengan jarak antara elektroda 3 meter. Total lintasan pada penelitian ini adalah 11 lintasan. Akuisisi data pada penelitian ini menggunakan alat *Ares*. Selanjutnya, pengolahan data hasil pengukuran akan diolah dengan *software Res2dinv* ver.355 dan *Surfer 9* untuk mendapatkan *true resistivity* dan penampang dua dimensi dan kemudian menggunakan *software Res3dinv* ver.2.12 dan *Geoslicer X* untuk membuat pemodelan tiga dimensi.

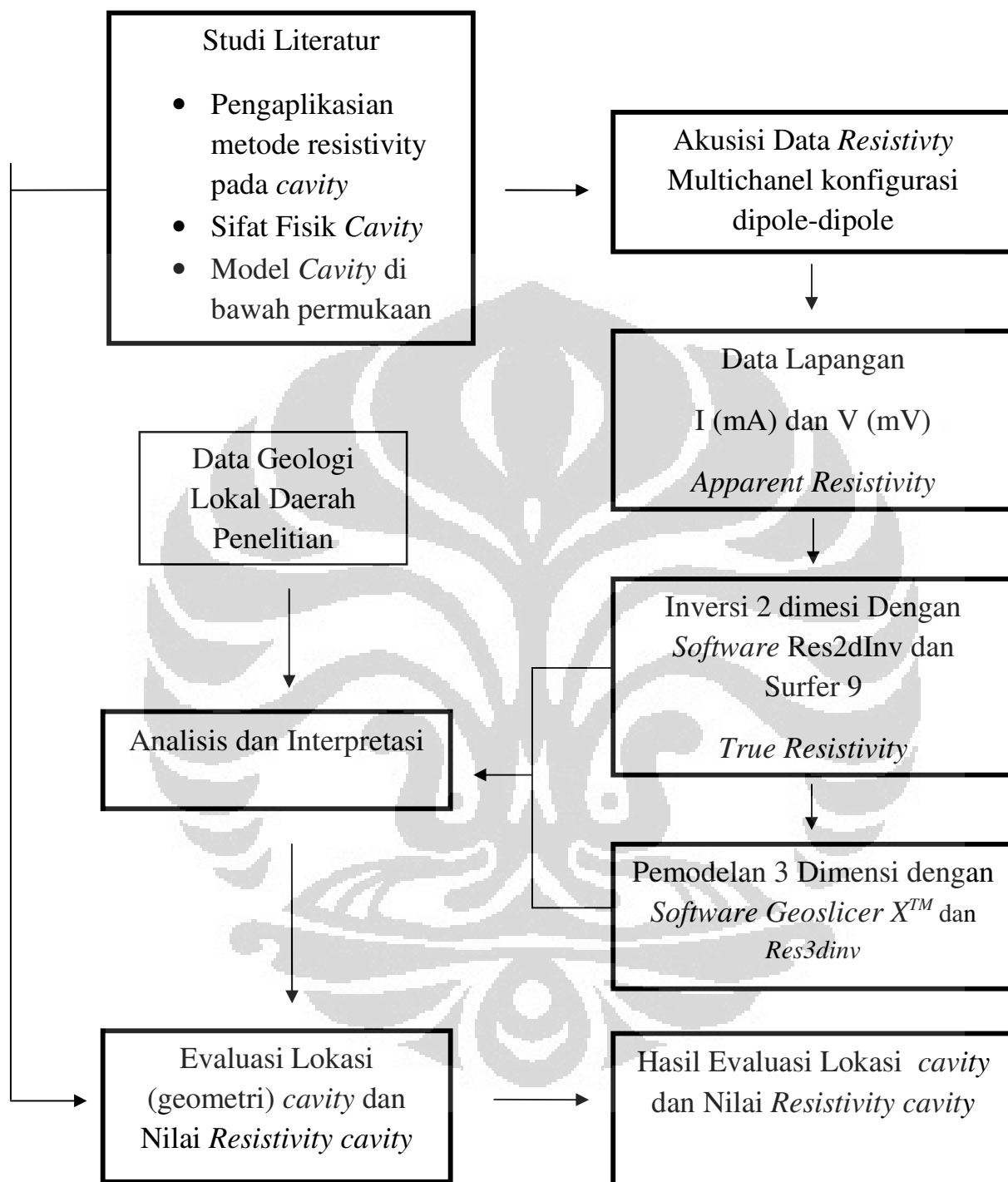
1.4 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di daerah "X" yang terletak di Bogor. Waktu penelitian dibagi menjadi empat tahap yaitu akuisisi data *resistivity* pada tanggal 14 September 2011, 24 Oktober 2011, 20 Desember 2011, dan 26 Desember 2011. Selanjutnya, proses pengolahan data serta pengerjaan laporan tugas akhir ini dilakukan pada waktu lima bulan (Januari – Mei 2012).

Universitas Indonesia

1.5 Metodologi Penelitian

Tahapan awal pada penelitian ini adalah studi literatur mengenai *cavity*. Pada tahap ini Penulis juga mempelajari aplikasi metode *resistivity* pada *cavity* dan karakteristik fisik *cavity* dan modelnya yang terdapat di bawah permukaan. Selanjutnya, Penulis melakukan survei *resistivity* di lapangan serta pengolahan data *resistivity*. Akuisisi data berlangsung dalam empat periode. Periode pertama dan kedua dilakukan pada tanggal 14 September 2011 dan 24 September 2011. Sedangkan periode ketiga dan keempat dilakukan pada tanggal 20 Desember 2011 dan 26 Desember 2011. Setelah melakukan akuisisi data di lapangan, kemudian didapatkan nilai *apparent resistivity*. Selanjutnya, melakukan pengolahan data dengan menggunakan *software Res2dinv* dan *Surfer 9* untuk mendapatkan *true resistivity* dan penampang resistivitas dua dimensi. Selanjutnya, pemodelan tiga dimensi menggunakan *software Res3dinv* dan *Geoslicer X* untuk pemodelan tiga dimensi. Seluruh metodologi penelitian ini digambarkan menjadi diagram alir penelitian (Gambar 1).



Gambar 1.1 Diagram alir penelitian metode *resistivity*

BAB 2

TEORI DASAR

2.1 Teori Dasar *Resistivity*

Metode *resistivity* adalah salah satu metode geofisika yang bertujuan mempelajari sifat fisis batuan atau objek yang terdapat di bawah permukaan. Metode ini bertujuan menggambarkan distribusi nilai *resistivity* di bawah permukaan bumi dari hasil pengukuran yang dilakukan di permukaan bumi (Loke, 1999). Dari pengukuran tersebut diperoleh parameter fisis yaitu nilai *apparent resistivity*. Selanjutnya, untuk mendapatkan *true resistivity* yaitu dengan melakukan proses inversi. Nilai *resistivity* tersebut berhubungan dengan parameter-parameter geologi seperti mineral, kandungan fluida, porositas. Metode *resistivity* dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

1. *Resistivity Sounding*

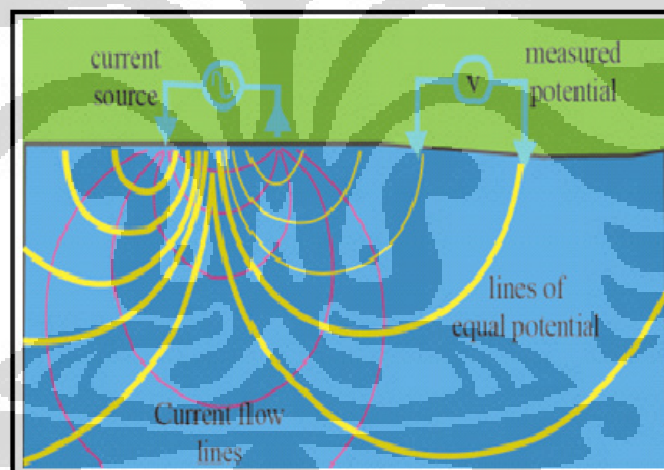
Metode *resistivity sounding* atau disebut juga *resistivity drilling/resistivity probing* bertujuan mempelajari variasi nilai *resistivity* batuan di bawah permukaan bumi secara vertikal. Pada metode ini, pengukuran pada suatu titik *sounding* dilakukan dengan cara mengubah-ubah jarak elektroda. Jarak elektroda ini sebanding dengan kedalaman lapisan objek yang akan dicari. Pada pengukuran sebenarnya di lapangan, perubahan jarak antara elektroda mungkin dilakukan jika memiliki alat geolistrik yang memadai. Dalam hal ini alat geolistrik harus dapat menghasilkan arus listrik yang cukup sensitif agar dapat mendeteksi beda potensial yang sangat kecil sekali. Oleh karena itu, alat geolistrik yang baik adalah alat yang dapat menghasilkan arus listrik yang cukup besar, dan mempunyai sensitivitas yang cukup tinggi.

2. Resistivity Mapping

Nilai *resistivity* sesungguhnya bervariasi baik dalam arah vertikal maupun horisontal, sehingga *resistivity sounding* belum dapat memberikan hasil yang akurat. Oleh sebab itu, metode *resistivity mapping* bertujuan mendapatkan variasi nilai *resistivity* lapisan bawah permukaan secara horisontal. Pemetaan *resistivity mapping* akan memberikan keadaan di bawah permukaan bumi secara mendatar, sebab pengukuran *resistivity* dilakukan dengan jarak elektroda yang sama.

2.1.1 Medan Potensial Pada Medium Homogen

Jika arus listrik mengalir ke dalam bumi yang homogen isotropik melalui elektroda arus, maka arus mengalir ke segala arah dan permukaan ekuipotensial dalam bumi berupa permukaan bola seperti terlihat pada Gambar 2.1 :



Gambar 2.1 Medan potensial pada medium yang homogen (Daud, 2008)

Karena arus yang mengalir adalah kontinu pada medium yang homogen isotropik, bila δA adalah elemen permukaan dan \mathbf{J} rapat arus dalam ampere/meter². Maka arus yang melalui permukaan δA adalah $\mathbf{J} \cdot \delta A$. Selanjutnya, berdasarkan Hukum Ohm hubungan antara rapat arus \mathbf{J} dengan medan listrik \mathbf{E} adalah :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.1)$$

Universitas Indonesia

Dimana, E = medan listrik dalam volt/meter, dan σ adalah konduktivitas bahan dalam meter/ohm dan ρ adalah *resistivity* dalam ohm.meter. Medan listrik E dapat dinyatakan sebagai gradien potensial (Telford *et al.*, 1990) :

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.2)$$

V dalam satuan volt, maka jika persamaan 2.2 disubstitusikan ke persamaan 2.1 menjadi :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla V \quad (2.3)$$

Aliran arus listrik dalam suatu medium memenuhi hukum kontinuitas untuk arus dan didasarkan pada prinsip hukum kekekalan muatan yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.4)$$

Dimana q = rapat muatan dalam satuan coulomb/m³. Apabila arusnya stasioner, maka:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2.5)$$

Jika persamaan (2.3) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.5) maka diperoleh :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (2.6)$$

Atau
$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.7)$$

Untuk medium yang homogen isotropik, potensial adalah konstan maka persamaan memenuhi persamaan Laplace :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.8)$$

2.1.2 Sebuah Elektroda Arus Di Bawah Permukaan

Apabila sebuah elektroda arus yang kecil diinjeksikan kedalam medium yang homogen isotropik, maka rangkaian arus dengan elektroda lainnya biasanya diletakkan dipermukaan dan sangat jauh agar pengaruhnya terhadap elektroda pertama dapat diabaikan. Dalam sistem koordinat bola persamaan Laplace dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} \right\} \quad (2.9)$$

Karena sifat homogen dari medium maka V hanya merupakan fungsi jarak, sehingga:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right\} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (2.11)$$

Atau
$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = - \left(\frac{2}{r} \right) \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.12)$$

Persamaan dikalikan dengan r^2 , sehingga diperoleh :

$$r^2 \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = -(2r) \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.13)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.13) diperoleh solusi persamaan :

$$V = - \frac{A}{r} + B \quad (2.14)$$

Dengan A dan B adalah konstanta, karena $V=0$ untuk r mendekati tak hingga maka nilai dari $B=0$. Sehingga total arus yang melewati permukaan bola adalah :

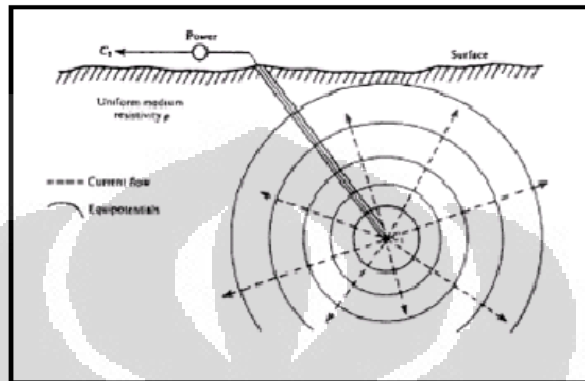
$$I = 4\pi r^2 J = -4\pi r^2 \sigma \frac{\partial V}{\partial r} = -4\pi \sigma A \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.15 diperoleh :

$$A = - \frac{I\rho}{4\pi} \quad \text{dengan } \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.16)$$

Sehingga nilai potential elektroda tunggal ini adalah :

$$V = \left(\frac{\rho}{4\pi}\right) \frac{1}{r} \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{4\pi r V}{I} \quad (2.17)$$



Gambar 2.2 Sebuah elektroda arus di bawah permukaan (Telford et al., 1990)

2.1.3 Sumber Arus Tunggal Di Permukaan

Jika elektroda arus I yang terletak di permukaan medium homogen isotropik dan terdapat konduktivitas udara di atasnya. Kondisi batas antara arus dipermukaan bumi sedikit berbeda dibandingkan dengan elektroda arus di bawah permukaan, walaupun $B=0$. Pada saat $V=0$ untuk r dan juga $\frac{dV}{dz} = 0$ pada $z = 0$ (karena $\sigma_{\text{udara}} = 0$). Kondisi ini terpenuhi karena :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{A}{r} \right) = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{A}{r} \right) \left(\frac{\partial r}{\partial x} \right) = \frac{A_z}{r^2} \quad (2.18)$$

Dimana $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Untuk permukaan setengah bola arus yang mengalir memenuhi persamaan 2.19 :

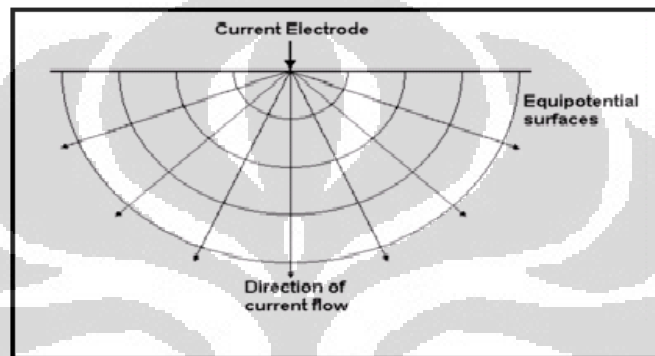
$$I = 2\pi r^2 J = -2\pi r^2 \frac{dV}{dr} = \frac{-2\pi r^2 \sigma A}{r^2} = -2\pi \sigma A \quad (2.19)$$

Maka
$$A = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad \text{dengan} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.20)$$

Sehingga diperoleh :

$$V = -\frac{A}{r} = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right)\frac{1}{r} \text{ atau } \rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (2.21)$$

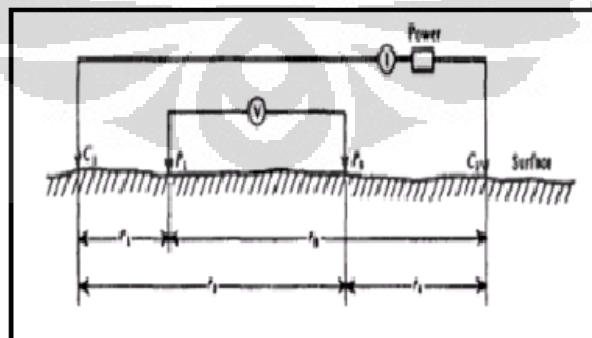
Permukaan ekuipotensial adalah permukaan setengah bola dengan garis aliran arus lurus dan medan listriknya berupa lingkaran yang berarah radial, seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sumber arus tunggal di permukaan (Loke,1999)

2.1.4 Dua sumber Arus Di Permukaan

Jika jarak antara kedua elektroda terbatas (Gambar 2.4). Potensial listrik pada titik-titik yang berdekatan dipermukaan akan dipengaruhi oleh kedua elektroda arus tersebut.



Gambar 2.4 Dua sumber arus di permukaan (Telford *et al.*, 1990)

Nilai potensial listrik adalah respon dari dua elektroda yang merupakan penjumlahan harga potensial dari masing-masing elektroda. Apabila jarak antara kedua elektroda terhingga, maka potensial pada suatu titik dipermukaan dipengaruhi oleh kedua elektroda.

Sehingga potensial yang disebabkan oleh C_1 dan P_2 adalah :

$$V_1 = -\frac{A_1}{r_1} \text{ dimana } A_1 = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.22)$$

Demikian juga potensial yang disebabkan C_2 dan P_1 adalah :

$$V_2 = -\frac{A_2}{r_2} \text{ dimana } A_2 = -A_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.23)$$

(Tanda berlawanan disebabkan karena arus pada kedua elektroda sama tetapi arahnya berlawanan).

Sehingga potensial pada titik P_1 adalah :

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.24)$$

Dengan cara yang sama maka dapat menentukan potensial di titik P_2 . Sehingga, diperoleh beda potensial antara P_1 dan P_2 adalah :

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \text{ atau } \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} K \quad (2.25)$$

K merupakan faktor geometri yang tergantung pada susunan elektroda. Harga K ini dapat dihitung apabila jarak antara elektroda satu dengan lainnya diketahui, selanjutnya dapat ditentukan dengan pembacaan ΔV antara P_1 dan P_2 dan arus yang dialirkan. Biasanya pada alat harga $\Delta V / I$ dapat dibaca langsung dan nilai *apparent resistivity* dapat diperoleh dengan persamaan :

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{KI} \quad (2.26)$$

Untuk jarak elektroda yang panjang/jauh ρ adalah *apparent resistivity* dan untuk jarak yang pendek biasanya berhubungan langsung dengan lapisan permukaan yang merupakan tahanan lapisan jenis pertama.

2.2 Konsep *Apparent Resistivity*

Dalam pengukuran *resistivity*, dapat diasumsikan bahwa bumi mempunyai sifat homogen isotropik. Dengan asumsi ini *resistivity* yang terukur merupakan nilai *resistivity* sebenarnya dan bergantung pada spasi elektroda $\rho = k \frac{\Delta V}{I}$. Pada kenyataannya bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan nilai *resistivity* yang berbeda-beda karena memiliki sifat heterogen-anisotropik, sehingga potensial yang terukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Maka nilai *resistivity* yang terukur bukan merupakan nilai *resistivity* untuk satu lapisan saja dan juga bukan *true resistivity* melainkan *apparent resistivity*, hal ini terutama untuk spasi elektroda yang lebar.

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2.27)$$

Dengan ρ_a merupakan *resistivity* semu yang bergantung spasi elektroda. Untuk kasus yang tidak homogen, *subsurface* diasumsikan berlapis-lapis dengan masing-masing lapisan mempunyai nilai *resistivity* yang berbeda (Gambar 2.5). *Resistivity* semu merupakan *resistivity* dari suatu medium fiktif yang ekuivalen dengan dengan medium berlapis yang ditinjau.



Gambar 2.5 Konsep *apparent resistivity* pada medium berlapis.

Anggap medium berlapis yang ditinjau, misalnya terdiri dari dua lapis dan mempunyai nilai *resistivity* yang berbeda (ρ_1 dan ρ_2). Dalam pengukuran, medium ini dianggap sebagai medium satu lapis homogen yang memiliki satu nilai *resistivity* semu (*resistivity apparent* ρ_a). *Resistivity* semu ini merepresentasikan secara kualitatif distribusi *resistivity* di bawah permukaan.

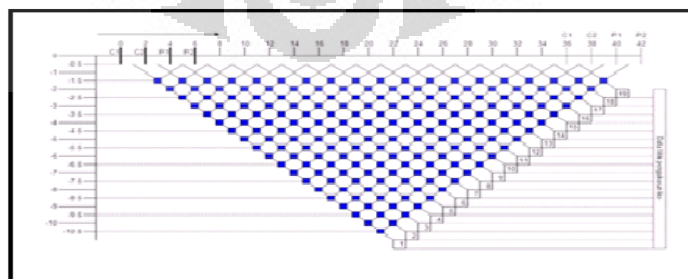
2.2.1 Konfigurasi Elektroda

Pada metoda *resistivity*, arus listrik diinjeksikan ke bawah permukaan melalui dua elektroda arus (terletak di luar konfigurasi). Beda potensial yang terjadi diukur melalui dua elektroda potensial yang berada di dalam konfigurasi. Dari hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu, dapat ditentukan variasi nilai hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah titik ukur (titik sounding).

Pengaturan letak elektroda-elektroda atau sering disebut sebagai konfigurasi elektroda dapat memiliki beberapa variasi. Konfigurasi elektroda yang banyak digunakan adalah konfigurasi Wenner, konfigurasi Schlumberger, konfigurasi pole-dipole, dan konfigurasi dipole-dipole. Pada penelitian ini yang digunakan adalah konfigurasi *dipole-dipole*.

2.2.1.1 Konfigurasi *Dipole-Dipole*

Gambar 2.6 merupakan susunan elektroda konfigurasi *dipole-dipole*. Konfigurasi ini adalah konfigurasi yang dipergunakan dalam pengukuran di lapangan.



Gambar 2.6 Rangkaian susunan elektroda konfigurasi *dipole-dipole* (Daniel, 2009)

Universitas Indonesia

Rangkaian elektroda susunan *dipole-dipole* dapat dilihat pada Gambar 2.6. Jarak antara pasangan elektroda arus adalah “a” yang besarnya sama dengan jarak pasangan elektroda potensial. Terdapat besaran lain dalam susunan ini, yakni “n”. Ini adalah perbandingan antara jarak arus elektroda arus-potensial terhadap jarak antara jarak antara kedua pasang elektroda arus potensial. Besarnya “a” dibuat tetap serta faktor “n” meningkat mulai dari 1 ke 2 ke 3 sampai sekitar 6 untuk meningkatkan *depth of investigation*.

Jarak antara elektroda a dan n adalah kelipatan bilangan bulat, didapat titik di bawah permukaan yang terdeteksi yakni *plotting point* atau *depth of investigation*. Sebuah data plot ini terdapat perpotongan garis yang ditarik dari pusat *dipole* elektroda, 45 derajat terhadap horisontal (Bodmer dan Stanley, 1968). Besarnya *depth of investigation* bergantung pada harga n yang memberikan harga *offset* antara elektroda arus dan potensial. Setiap susunan elektroda memiliki harga sensitivitas yang menunjukkan keakuratan data yang terukur berkenaan dengan besarnya faktor “n” yang digunakan.

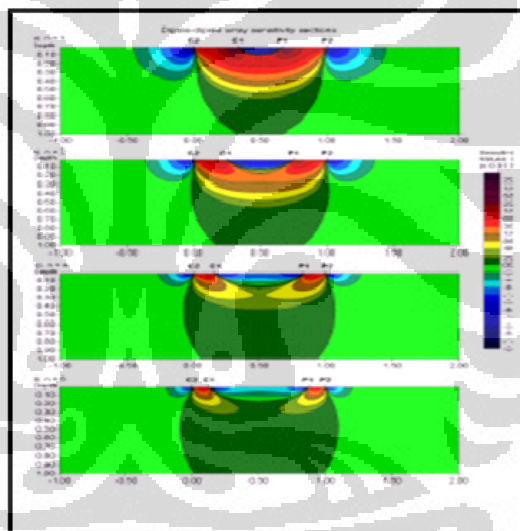
Gambar 2.7 menunjukkan sensitivitas susunan konfigurasi elektroda *dipole-dipole* untuk “n” mulai dari 1 sampai 6. Nilai sensitivitas terbesar umumnya terletak antara pasangan elektroda arus dan pasangan elektroda potensial. Hal ini menunjukkan bahwa susunan ini sangat sensitif terhadap perubahan *resistivity* di bawah elektroda pada setiap pasang (Loke, 1999). Seiring membesarnya faktor “n” sensitivitas tinggi semakin terkonsentrasi di bawah pasangan elektroda arus-potensial dan sensitivitas rendah pasangan elektroda arus-potensial terdalam semakin mengecil.

Berdasarkan hal ini, susunan konfigurasi *dipole-dipole* sangat sensitif terhadap perubahan *resistivity* secara horisontal tetapi kurang sensitif terhadap perubahan *resistivity* secara vertikal. Median *depth of investigation* untuk susunan ini bergantung pada harga “a” dan faktor “n”. salah satu kekurangan yang mungkin dari susunan ini adalah kecilnya kekuatan sinyal untuk harga faktor “n” yang besar. Tegangan berbanding terbalik terhadap pangkat tiga faktor “n”. untuk arus yang

Universitas Indonesia

sama, tegangan yang terukur resistivitymeter turun sekitar 56 kali ketika “n” meningkat dari 1 ke 6. Untuk mengatasi hal ini adalah dengan memperbesar harga “a” untuk mengurangi turunnya potensial ketika keseluruhan panjang susunan meningkat untuk memperbesar *depth of investigation*.

Untuk menggunakan susunan ini dengan efektif, peralatan yang dipergunakan harus memiliki sensitivitas yang tinggi dan sirkuit penolak *noise* yang sangat baik, juga kontak elektroda dengan tanah yang harus baik. Penentuan besarnya harga “a” serta faktor “n” juga diupayakan secermat mungkin dengan pertimbangan ketepatan *depth of investigation* terhadap dimensi objek yang akan diteliti. Dengan upaya ini diharapkan titik data (*plotting point*) jatuh tepat pada objek yang diteliti.



Gambar 2.7 Sensitivitas konfigurasi *dipole-dipole* (Loke, 1999)

2.2.2 Sifat Kelistrikan Batuan

Sifat kelistrikan batuan adalah karakteristik batuan bila dialirkan arus listrik ke batuan tersebut. Arus listrik ini dapat berasal dari alam itu sendiri atau arus listrik yang sengaja diinjeksikan ke batuan tersebut. Aliran arus listrik pada batuan dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi secara elektronik, konduksi secara elektrolitik, dan konduksi secara dielektrik (Telford *et al.*,1990).

Universitas Indonesia

- Konduksi secara elektronik terjadi apabila batuan memiliki banyak elektron bebas, sehingga arus listrik yang mengalir dalam batuan dialirkan oleh elektron bebas.
- Konduksi secara elektrolitik terjadi jika batuan bersifat porus dan pori-pori tersebut terisi fluida-fluida elektrolitik. Pada kondisi ini aliran arus listrik oleh ion-ion elektrolit.
- Konduksi secara dielektrik terjadi jika batuan bersifat dielektrik artinya batuan tersebut mempunyai elektron bebas sedikit bahkan tidak memiliki elektron bebas. Peristiwa pada kondisi ini berbeda tergantung konstanta dielektrik yang dimiliki batuan.

Berdasarkan nilai resistivitasnya, batuan dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian (Telford *et al*,1990) yaitu :

- Konduktor baik dengan nilai resistivitasnya adalah $10^{-6} < \rho < 1 \Omega m$.
- Konduktor buruk dengan nilai resistivitasnya adalah $1 < \rho < 10^7 \Omega m$.
- Isolator dengan nilai resistivitasnya adalah $\rho > 10^7 \Omega m$.

Variasi nilai *resistivity* batuan dan mineral ditampilkan dalam tabel 2.1(Telford *et al*).

| No | Material | Resistivity (Ωm -meter) |
|----|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Air | Infinite |
| 2 | Asph | 4 |
| 3 | Dry Sandy Soil | 80-1050 |
| 4 | Saturated sandfill | 15-30 |
| 5 | Unsaturated sandfill | 30-100 |
| 6 | Top soil | 250-1700 |
| 7 | Soil (20% clay) | 33 |
| 8 | Soil (40% clay) | 8 |
| 9 | Granite | $10^7 - 10^8$ |
| 10 | Basalt | $10 - 1 \times 10^7$ |
| 11 | Limestones | $50 - 1 \times 10^7$ |
| 12 | Sandstones | $1 - 1 \times 10^8$ |
| 13 | Shales | $20 - 2 \times 10^8$ |
| 14 | Dolomite | 100 - 10.000 |
| 15 | Sand | 1 - 1.000 |
| 16 | Clay | 1 - 100 |
| 17 | Ground Water | 0.5 - 300 |
| 18 | Sea Water | 0.2 |

2.2.2.1 Potential Listrik Batuan

Potential listrik alam atau potential diri disebabkan karena terjadinya peristiwa elektrokimia atau kegiatan mekanik di bawah permukaan. Potential ini berhubungan dengan pelapukan mineral dan perbedaan sifat batuan pada kontak geologi. Potential ini dapat dikelompokkan sebagai :

1. Potential elektrokinetik yaitu potential yang disebabkan oleh fluida yang bergerak melalui medium yang berpori.
2. Potential difusi yaitu potential yang disebabkan oleh adanya perbedaan mobilitas dari ion dalam larutan yang mempunyai konsentrasi yang berbeda.
3. Potential *nerust* yaitu jika suatu elektroda dimasukkan ke dalam suatu larutan yang homogen.
4. Potential mineralisasi yaitu jika dua elektroda dimasukkan ke dalam larutan homogen. Nilai potential ini paling besar nilainya bila dibandingkan dengan jenis potential lainnya. Potential ini sering terdapat pada daerah yang mengandung sulfida, graphite.

2.2.2.2 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Nilai *Resistivity*

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi nilai *resistivity*. Faktor-faktor tersebut adalah jenis batuan, matriks batuan, mineral lempung, porositas, permeabilitas, salinitas.

- Jenis Batuan

Masing-masing jenis batuan memiliki interval nilai *resistivity*. Namun, suatu interval nilai *resistivity* batuan tertentu biasanya sebagian memiliki nilai *resistivity* yang sama dengan interval *resistivity* batuan jenis yang lain yang disebut dengan istilah *overlapping range* (Daniel, 2009). Oleh karena itu, data *resistivity* sering kali belum dapat memberikan gambaran yang lebih spesifik mengenai objek yang akan dicari. Untuk dapat memberikan gambaran yang lebih spesifik diperlukan data-data

pendukung seperti data geologi dan sumur (*logging*) yang memberikan gambaran litologi batuan di bawah permukaan.

- Matriks batuan

Batu pasir terpilah memiliki ruang kosong yang besar menyebabkan lebih konduktif apabila terisi air daripada batu pasir yang terpilah buruk.

- Mineral Lempung

Iklim tropis seperti di Indonesia merupakan faktor alamiah yang sangat mempengaruhi kondisi batuan, terutama apabila terjadi proses pelapukan. Dalam suatu proses pelapukan, semua material (batuan, logam, dan sebagainya) akan diubah menjadi lempung. Tingginya kandungan lempung menyebabkan rendahnya nilai *resistivity*.

- Porositas dan permeabilitas

Porositas adalah persentasi dari volume fluida dalam pori dengan volume total batuan. Sedangkan permeabilitas adalah kemampuan batuan untuk meneruskan fluida dan ion-ion. Apabila porositas dan permeabilitas fluida dapat dikaitkan untuk memberikan jenis batuan atau tanah, maka hal tersebut dapat digunakan juga untuk menunjukkan bahwa adanya hubungan antara permeabilitas batuan dan *resistivity*. Porositas dan permeabilitas di formulasikan pada persamaan 2.28 dan 2.29.

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m} \quad 2.28$$

Dimana :

$F = \frac{\rho_r}{\rho_e}$ merupakan faktor formasi.

ρ_r merupakan resistivity batuan, ρ_e dapat juga adalah resistivity fluida di dalam pori batuan.

ϕ merupakan porositas, yang mana a dan m adalah konstanta khusus.

Universitas Indonesia

$$\text{permeabilitas} = \left[\frac{\text{Debit aliran}}{\text{Penampang}} \right] \times \text{Gradien Hidrolik} \quad 2.29$$

- Salinitas

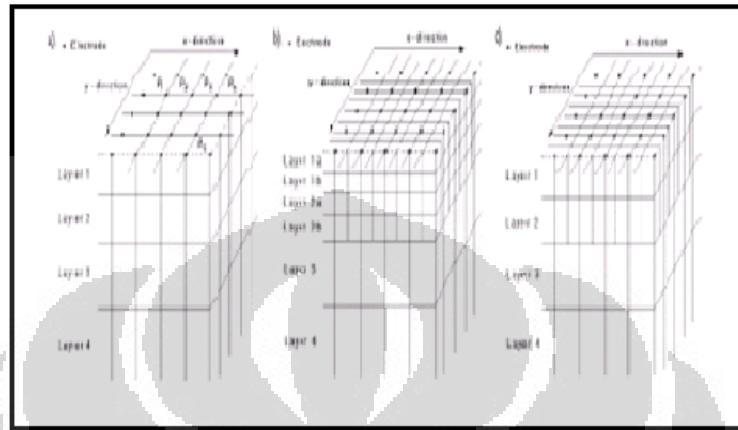
Ion-ion yang terkandung dalam air asin menyebabkan batuan yang didalamnya terdapat air asin yang mudah mengalirkan elektron-elektron bebas melalui media tersebut sehingga air asin memberikan respons yang lebih rendah terhadap nilai *resistivity* daripada lempung. Tingginya salinitas pada daerah eksplorasi bisa disebabkan oleh adanya intrusi air laut. Selain itu bisa juga karena adanya danau setempat yang mengalami evaporasi yang tinggi dampai terbentuknya batuan evaporasi.

2.3 Teori Dasar Inversi

Proses inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis objek di bawah permukaan (Supriyanto, 2007). Pada metode inversi geofisika, model yang dicari berupa representasi matematika bagian dari bumi yang memberi respons yang sesuai dengan hasil pengukuran yang kemudian model tersebut didiskritisasi. Diskritisasi model dapat dilakukan dengan tiga cara. Pertama, membagi model menjadi blok-blok kecil yang lebarnya sama dengan jarak terkecil antara elektroda. Selanjutnya, membagi model menjadi blok-blok yang pada beberapa lapisan pertamanya dibagi dua secara vertikal maupun horisontal dari cara yang pertama. Dan tahap ketiga, blok-blok yang pada beberapa lapisan pertamanya hanya dibagi dua secara horisontal saja (Gambar 2.8). Hal ini disebabkan resolusi metode *resistivity* berkurang dengan bertambahnya kedalaman, maka lebih efektif jika blok yang dibagi dua hanya lapisan pertama dan kedua saja (Loke, 1999).

Setiap titik pada diskritisasi model tersebut kemudian diberikan suatu parameter berupa nilai *resistivity* yang nilainya sama dengan yang diinginkan oleh penginversi juga hasil pengukuran. Sedangkan respon model merupakan data sintetik yang dihitung

dengan hubungan secara matematika berdasarkan pada model yang dengan parameter yang dimilikinya.



Gambar 2.8 Diskritisasi model pada proses inversi (Loke, 1999)

Hubungan antara model dan respon model baik untuk model dua dimensi maupun model tiga dimensi dapat diselesaikan dengan menggunakan metode *finite difference* (Dey dan Morrison, 1979a, 1979b) atau *finite element* (Silvester dan Ferrari, 1990).

Pada metode optimasi, sebuah model awal dimodifikasi dengan metode iterasi hingga beda antara respon model dan hasil pengukuran dapat direduksi (Loke, 1999). Data yang terukur dapat ditulis dalam sebuah vektor kolom y :

$$y = \text{column}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2.30)$$

Dimana m adalah banyaknya pengukuran. Respon model f dapat ditulis dengan cara yang sama dalam bentuk

$$f = \text{column}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2.31)$$

Pada nilai *resistivity*, lebih mudah digunakan logaritma dari nilai *true resistivity* untuk hasil pengukuran respon model dan parameter model. Parameter model dapat direpresentasikan oleh vektor q berikut ini :

$$q = \text{column}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.32)$$

Universitas Indonesia

Dimana n adalah banyaknya parameter model. Dan beda antara hasil pengukuran dan respon model diberikan oleh persamaan :

$$g = y - f \quad (2.33)$$

Pada metode optimasi *least square*, model awal dimodifikasi hingga jumlah kuadrat kesalahan E dari selisih antara respon model dan hasil pengukuran dapat diperkecil:

$$E = g^t g \quad (2.34)$$

Untuk mengurangi kesalahan pada persamaan 2.34, maka persamaan Gauss-Newton (persamaan 2.35) digunakan untuk menentukan perubahan dalam parameter model yang seharusnya dapat mengurangi jumlah kuadrat kesalahan (Lines dan Treitel, 1984).

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (2.35)$$

Dimana Δq adalah vektor perubahan parameter model, dan J adalah turunan parsial pada matriks Jacobian. Elemen matriks Jacobian diberikan oleh persamaan :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial f_j} \quad (2.36)$$

Persamaan 2.37 merepresentasikan perubahan model pada respon model ke- i (i^{th} *parameter model*) yang disebabkan oleh karena perubahan parameter model ke- j (j^{th} *model parameter*). Setelah melakukan perhitungan vektor perubahan parameter, maka didapatkan sebuah model baru yang diperoleh dari persamaan 2.37.

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (2.37)$$

Pada aplikasinya, persamaan kuadrat terkecil sederhana (persamaan 2.35) jarang digunakan secara independen pada proses inversi geofisika. Pada beberapa kondisi hasil produk matriks mungkin bernilai tunggal, sehingga persamaan kuadrat terkecil tidak memiliki penyelesaian untuk Δq . Terdapat masalah umum lainnya bahwa produk matriks $J^T J$ mendekati tunggal (*singular*). Hal ini dapat disebabkan apabila

model awal yang buruk yang sangat berbeda dengan model optimum yang digunakan. Perubahan parameter vektor dihitung dengan menggunakan persamaan 2.35 dapat memiliki komponen yang terlalu besar, sehingga model baru yang dihitung menyebabkan memiliki nilai yang tidak realistis. Salah satu metode untuk menghindari masalah tersebut adalah dengan menggunakan modifikasi Marquardt-Levenberg (Lines dan Treitel, 1984) untuk persamaan Gauss-Newton yang dalam bentuk persamaan 2.38.

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (2.38)$$

Dimana I adalah matriks identitas. Faktor pengali λ disebut sebagai faktor Marquardt atau dengan istilah *damping factor* dan metode ini disebut juga sebagai *the ridge regression method* (Inman, 1975). *Damping factor* secara efektif membatasi *range* nilai sehingga komponen-komponen vektor parameter perubahan dan mengikutsertakan Δq dalam perhitungan. Pada metode Gauss Newton (persamaan 2.35), saat perhitungan berusaha meminimalkan jumlah kuadrat pada perbedaan vektor dan modifikasi metode Marquardt-Levenberg juga meminimalkan kombinasi dari besarnya perbedaan vektor dan parameter perubahan vektor. Metode ini telah berhasil digunakan dalam inversi data *resistivity sounding* dimana model terdiri dari beberapa lapisan-lapisan. Namun ketika jumlah parameter model sangat besar, seperti model inversi dua dimensi dan tiga dimensi yang terdiri dari banyaknya sel-sel yang berupa kotak-kotak, maka model yang dihasilkan oleh metode Marquardt-Levenberg dapat memiliki distribusi *resistivity* yang berada pada daerah yang bernilai *resistivity* rendah atau *resistivity* tinggi yang tidak merepresentasikan kondisi sebenarnya. (Constable *et al.*, 1987). Untuk mengatasi masalah ini, persamaan kuadrat terkecil Gauss-Newton dimodifikasi lebih sehingga dapat meminimalkan variasi-variasi spasial pada parameter-parameter model tersebut. Metode kuadrat terkecil *smoothness-constraint* (Ellis dan Oldenburg, 1994 a) terdapat dalam bentuk persamaan 2.39.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (2.39)$$

Universitas Indonesia

$$\text{dimana} \quad \mathbf{F} = \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{C}_x + \alpha_y \mathbf{C}_y^T \mathbf{C}_y + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{C}_z \quad (2.40)$$

Dan $\mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y,$ dan \mathbf{C}_z merupakan matriks (*smoothing matrices*) pada arah x,y,z dan $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ suatu besaran nilai relatif yang diberikan pada pada arah x,y,z .

Persamaan 2.40 juga mencoba untuk meminimalkan kuadrat perubahan spasial atau *roughness* pada nilai *resistivity* model. Metode ini sebenarnya merupakan metode optimasi *smoothness-constrained* normalisasi l_2 (*norm smoothness-constrained optimization method*). Metode ini cenderung menyebabkan menghasilkan model dengan variasi nilai *resistivity* yang *smooth*. Metode pendekatan ini dapat diterima jika *resistivity* di bawah permukaan yang sebenarnya bervariasi dengan sifat yang halus dan bergradasi pada kondisi bawah permukaan yang sesungguhnya. Pada beberapa kasus, kondisi geologi di bawah permukaan terdiri dari sejumlah daerah yang secara internal hampir homogen tetapi dengan batas-batas yang tajam (*sharp boundaries*) antara wilayah yang berbeda. Untuk kasus seperti tersebut, persamaan inversi 2.39 dapat dimodifikasi untuk meminimalkan perubahan secara absolut pada nilai *resistivity* model (Claerbout dan Muir, 1973), sehingga terkadang dapat memberikan hasil model bawah permukaan yang signifikan lebih baik. Metode ini secara umum dikenal sebagai metode optimasi normalisasi *smoothness-constrained* (*norm smoothness-constrained optimization method*) atau lebih dikenal juga sebagai metode inversi blok (*blocky inversion method*). Salah satu metode yang sederhana untuk menerapkan normalisasi l_1 adalah dengan menggunakan formulasi kuadrat terkecil yang dikenal sebagai metode kuadrat iterasi *reweighted* atau *iteratively reweighted least-squares method* (Wolke dan Schwetlick, 1988). Persamaan 2.39 dapat dimodifikasi menjadi persamaan 2.41.

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}_r) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{R}_d \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F}_r \mathbf{q}_k, \quad (2.41)$$

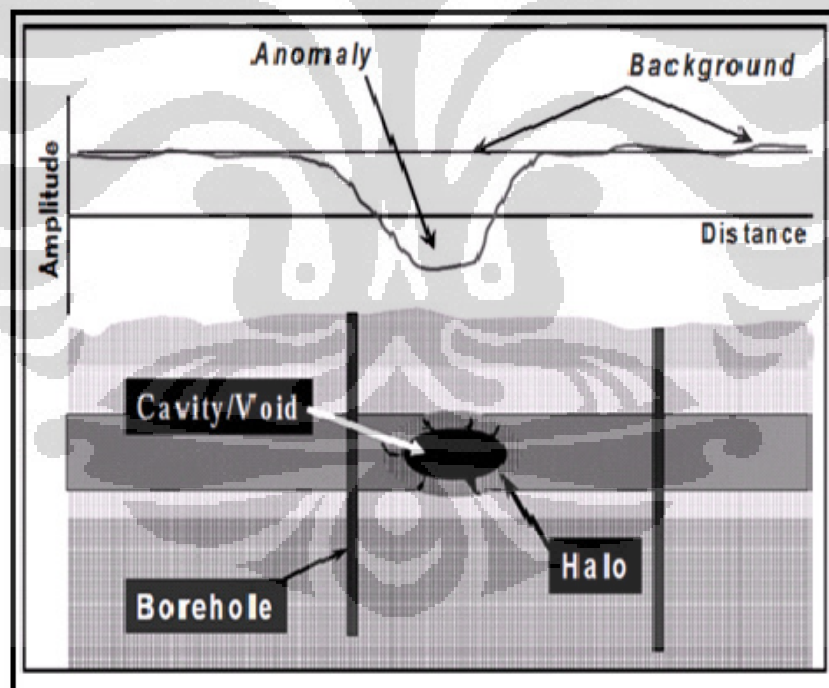
$$\text{Dengan } \mathbf{F}_r = \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_x + \alpha_y \mathbf{C}_y^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_y + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{R}_m \mathbf{C}_z \quad (2.42)$$

Dimana \mathbf{R}_d dan \mathbf{R}_m adalah *weighting matrices* yang sehingga elemen-elemen yang berbeda dari data yang tidak sesuai (*data misfit*) dan vektor-vektor model yang

roughness diberikan bobot yang sama dalam proses inversi. Persamaan 1.23 menyediakan suatu cara yang dapat dimodifikasi lebih lanjut jika dibutuhkan yang termasuk informasi mengenai geologi di bawah permukaan. Sebagai contoh, jika diketahui bahwa variasi *resistivity* di bawah permukaan kemungkinan terbatas pada wilayah tertentu (*limited zone*), maka nilai faktor peredaman λ (Ellis dan Oldenburg, 1994a) dapat diubah sedemikian rupa sehingga perubahan yang lebih signifikan diperbolehkan pada kondisi wilayah tersebut.

2.4 Teori *Cavity/Sinkhole*

Cavity merupakan suatu objek yang terdapat di bawah permukaan. Terdapatnya *cavity* di bawah permukaan merepresentasikan terdapatnya anomali pada *subsurface* (Gambar 2.9).



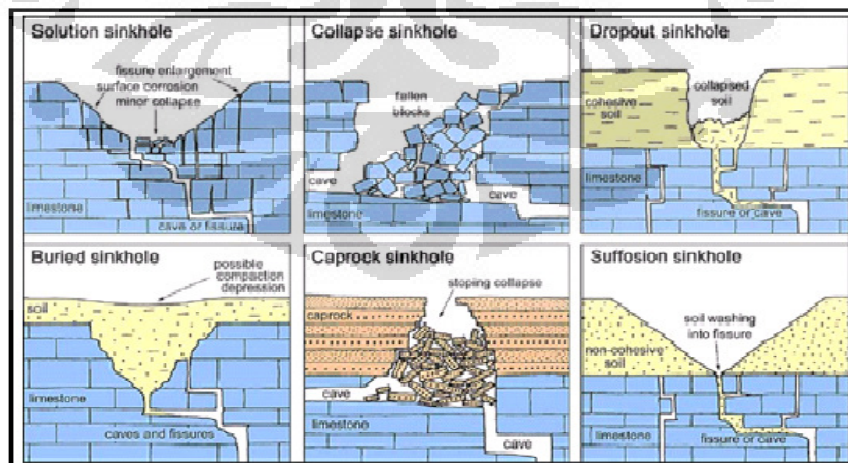
Gambar 2.9 Ilustrasi Sistem *Cavity* di bawah permukaan (Dwain K. Butler).

Terdapat beberapa definisi mengenai *sinkhole* yang terdapat di bawah permukaan yaitu :

1. *Sinkhole hazard is common in limestone karst, associated with collapse or subsidence which often end the life cycle of subsurface cavities* (Klimchouk, 2005; Brinkmann et al., 2008; Frumkin et al., 2009a; Parise et al., 2009).
2. *Sinkholes are surface manifestations of subsurface dissolution and internal erosion and deformation, commonly hidden from direct observation and from most subaerial geomorphological study methods* (Gutiérrez, 2009).
3. *Abelson et al. (2003) suggested that sinkholes tend develop along faults, which serve as preferential hydraulic pathways, bringing confined aggressive water upwards to contact with salt.*
4. *Sinkhole hazards are more commonly associated with dissolution of a covered or mantled salt bed* (Ford dan Williams, 2007).
5. *Sinkhole hazard related to subsurface dissolution of salt and collapse of overlying material may be extremely large* (Frumkli et al., 2011).
6. *Sinkholes are natural phenomena can be occurred in shallow geology sediments at different regions in the world.*(Al-Zoubi et al., 2007).
7. *Sinkholes are depressions on the land surface caused by water moving downward into cracks and passages in the limestone below* (Neawsupard dan Soisa).
8. *Sinkholes – various surface depressions, 1-1000 meter across, that are related to underlying rock cavities* (Waltham et al., 2005).
9. *Sinkholes are one of the most visible indications of bedrock instability in Karst formation* (Sinclair, 1982; Tharp, 1999; Waltham et al, 200; Gunay et al., 2011).
10. *Sinkholes can be induced through either natural causes or human activity sinkholes that occur naturally are usually formed by the slow, downward dissolution of Carbonate rock or through bedrock collapse in areas that overlie cavern* (Langer, 2001).

Menurut A.C Waltham dan P.G. Fookes *sinkhole* dapat diklasifikasikan sebagai (gambar 2.10) :

1. *Dissolution sinkholes are formed by slow dissolutorial lowering of the limestone outcrop or rockhead, aided by undermining and small scale collapse.*
2. *Collapse sinkholes are formed by instant progressive failure and collapse of the limestone roof over a large cavern or over a group of smaller caves.*
3. *Caprock sinkholes are comparable to collapse sinkholes, except that there is undermining and collapse of insoluble caprock over a karstic cavity in underlying limestone.*
4. *Dropout sinkholes are formed in cohesive soil cover, where percolating rainwater has washed the soil into stable fissures and caves in the underlying limestone.*
5. *Suffosion sinkholes are formed in non cohesive soil cover, where percolating rain water has washed the soil into stable fissures and caves in the underlying limestone.*
6. *Buried sinkholes occur where ancient dissolution or collapse sinkholes are filled with soil, debris or sediment due to a change of environment*



Gambar 2.10 Klasifikasi *Sinkhole* (A.C Waltham dan P.G. Fookes)

BAB 3

AKUISISI DATA

3.1 Akuisisi Data Metode *Resistivity*

Pada akuisisi data metode *resistivity* ini menggunakan konfigurasi *dipole-dipole* dengan jarak antara elektroda 5 meter kecuali pada lintasan J dan K yang jarak antara elektroda 3 meter. Konfigurasi ini digunakan sebab memiliki resolusi yang bagus untuk memetakan keberadaan *epikarstal fracture* dan gua (Roth et al, 1999; Labuda dan Baxter, 2001).

3.1.1 Peralatan Pengukuran Di Lapangan

Peralatan yang digunakan dalam pengukuran di lapangan yaitu :

1. Global Positioning System (GPS)

GPS yang digunakan bermerek Garmin . GPS ini digunakan sebagai pemetaan titik lokasi objek dan titik-titik peletakan remote elektroda.

2. Kompas

Kompas berfungsi untuk menentukan arah pengukuran.

3. Resistivity Meter Multi-channel Laboratorium Geofisika Eksplorasi UI (gambar 3.2), yang terdiri dari komponen (Ares user manual version 5) gambar 3.1 :

- VES-adapter
- T-Piece
- Kabel
- AC adapter
- Battery pack
- RS232 and USB communication cables



Gambar 3.1 Komponen Alat Ares (Ares user manual version 5)

4. Transmitter
5. Aki yang merupakan sumber arus.
6. Elektroda yang menginjeksikan arus ke bawah permukaan.
7. Kabel yang digunakan untuk menghubungkan elektroda dengan sumber arus.
8. Palu dan Meteran

Palu digunakan untuk menancapkan elektrode ke dalam tanah, sedangkan meteran digunakan untuk mengukur jarak bentangan dan jarak antar elektrode.



Gambar 3.2 Alat Ares *Resistivity*

3.1.2 Prosedur pengukuran di lapangan

Proses akuisisi data metode *resistivity* dilakukan bersama tim Laboratorium Geofisika Universitas Indonesia (gambar 3.3) dengan beberapa tahapan diantaranya:

- Pembentangan meteran.
- Penentuan orientasi lintasan.
- Pembentangan kabel yang digunakan sebagai penghantar arus dan potential yang menghubungkan antara elektroda dengan alat Ares.
- Pemasangan kabel ke elektroda untuk menghubungkan kabel dengan elektroda agar arus dan potential agar dapat terhubung ke elektroda.
- Pengaturan resistivity meter Multi-Chanel.
- Menentukan titik koordinat elektroda dengan GPS



Gambar 3.3 Tim Laboratorium Geofisika Universitas Indonesia

3.2 Desain Survei Pengukuran



Gambar 3.4 Lintasan Survei Pengukuran

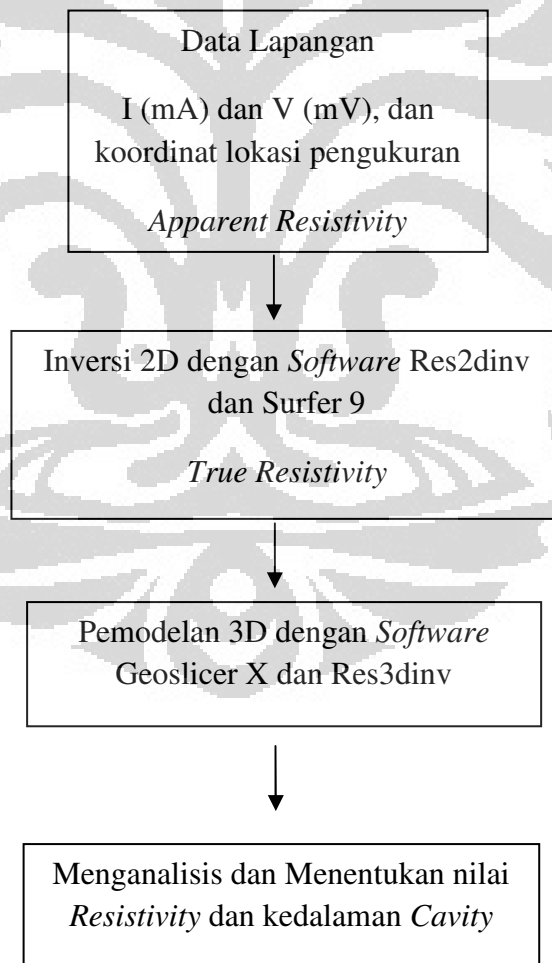
Gambar 4.4 merupakan lintasan pengukuran *resistivity* yang terdiri dari *line A* sampai *line K*. *line A* memiliki panjang lintasan 145 meter sedangkan *line B*, *line C*, dan *line E* memiliki panjang lintasan 155 meter dengan jarak antara elektroda 5 meter. Pada *line D* dan *line F* memiliki panjang lintasan 170 meter dan 115 meter yang meter dengan jarak antara elektroda 5 meter sedangkan *line G*, *line H*, dan *line I* masing-masing memiliki panjang lintasan 75 meter dengan jarak antara elektroda lima meter. Pada *line J* dan *line K* masing-masing memiliki panjang lintasan 141 meter dengan jarak antara elektroda 3 meter.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengolahan Data *Resistivity*

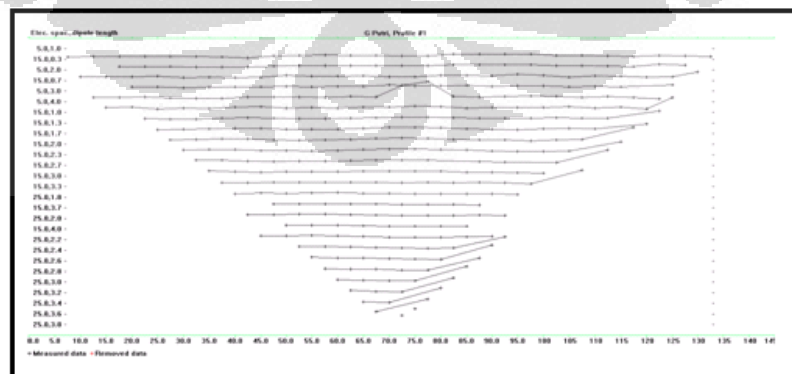
Setelah melakukan proses akuisisi data di lapangan, selanjutnya Penulis melakukan *loading* data untuk masing-masing lintasan menggunakan *software res2dinv*. Pengolahan ini bertujuan mendapatkan nilai *true resistivity* objek di bawah permukaan. Dari akuisisi data di lapangan, Penulis memperoleh data berupa koordinat lokasi pengukuran, nilai arus listrik, dan beda potensial. Tahapan-tahapan pengolahan data *resistivity* ditampilkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tahapan pengolahan data *resistivity*

4.1.1 Proses Pra-inversi

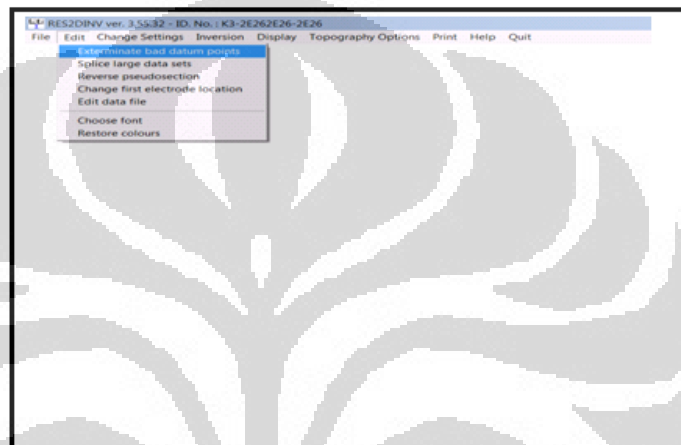
Untuk mendapatkan model objek di bawah permukaan yang baik, data yang didapatkan dari pengukuran di lapangan harus dengan kualitas yang baik. Sering kali pada pengukuran di lapangan mendapatkan data yang buruk yang disebabkan oleh *noise*. Pada metode *resistivity*, titik-titik data yang buruk disebut *systematic noise* dan *random noise*. *Systematic noise* biasanya disebabkan kegagalan pada waktu survei tersebut sehingga pembacaan tidak merepresentasikan nilai pengukuran *resistivity* sebenarnya. Misalkan, terjadi kerusakan pada kabel, kontak elektroda dengan tanah yang buruk sehingga arus yang diinjeksikan tidak dapat mengalir ke bawah permukaan, menghubungkan kabel ke arah yang salah, dan lupa melampirkan klip pada elektroda. Kesalahan pada *systematic noise* mudah untuk dideteksi dalam alat dan *setting* data yang terdapat dalam sejumlah nilai-nilai yang buruk biasanya tetap keluar seperti *sore thumbs*. Sedangkan, *random noise* merupakan *noise* seperti arus *telluric* yang mempengaruhi semua pembacaan nilai pengukuran. *Noise* ini dapat menyebabkan pembacaan pada alat bisa menjadi lebih rendah atau lebih tinggi dari pembacaan bebas *noise* yang seharusnya. *Random noise* ini sering muncul pada metode *resistivity* konfigurasi *dipole-dipole* dan *pole-dipole* yang memiliki faktor geometri yang besar. Berdasarkan hasil pengukuran di lapangan, terdapat beberapa lintasan pengukuran yang mengalami *noise*. Gambar 4.2 merupakan contoh terdapatnya titik data yang buruk pada lintasan A.



Gambar 4.2 Contoh tampilan data lapangan lintasan A dengan beberapa titik-titik data buruk

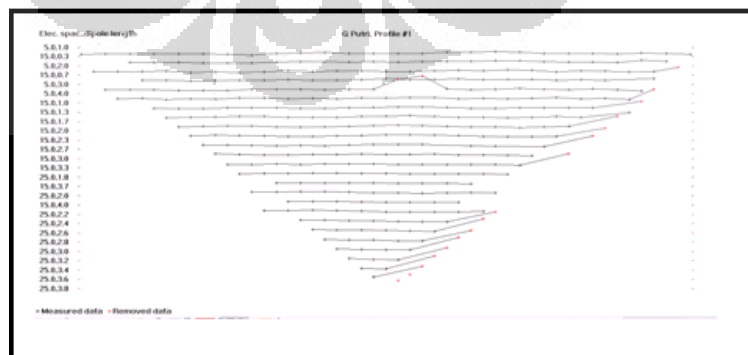
Untuk menghilangkan titik-titik data yang buruk sebelum melakukan proses inversi melalui beberapa tahapan. Proses ini dilakukan untuk semua lintasan pengukuran yang terdapat titik-titik data yang buruk. Proses untuk menghilangkan titik-titik data yang buruk pada *software* res2dinv yaitu :

- Setelah melakukan pembacaan pada data, kemudian pilih Edit→Exterminate datum *points* (Gambar 4.3).



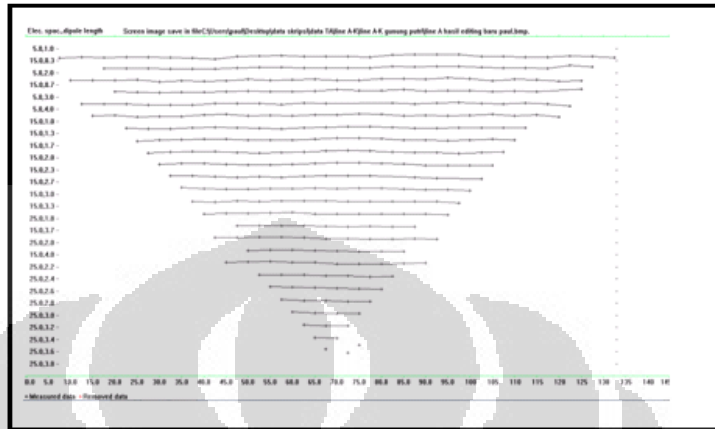
Gambar 4.3 Menu pilihan pada *software* res2dinv untuk menghilangkan titik data yang buruk

- Setelah itu akan muncul *point-point* data seperti Gambar 4.2. Untuk menghilangkan data yang buruk *klik* titik-titik data yang buruk tersebut sehingga titik-titik data tersebut berwarna merah (Gambar 4.4), kemudian *save* data yang telah melakukan proses menghilangkan titik-titik data yang buruk tersebut.



Gambar 4.4 Proses menghilangkan titik-titik data yang buruk pada *software* res2dinv

- Buka *file* yang telah disimpan tersebut, maka akan terlihat titik-titik data yang telah dihilangkan seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil dari proses menghilangkan titik-titik data yang buruk

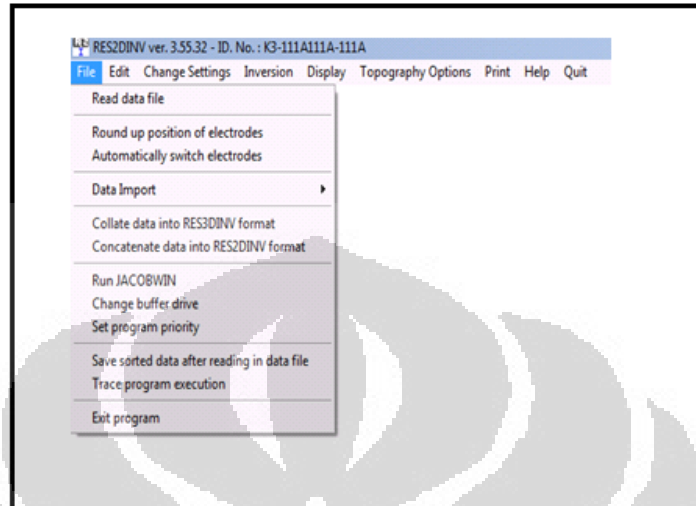
4.2 Software Res2dinv

Software Res2dinv adalah suatu *software* yang digunakan untuk mendapatkan model objek *resistivity* dua dimensi di bawah permukaan dari data hasil survei *resistivity* di lapangan (Griffith dan Barker, 1993). Model dua dimensi didapatkan dengan menggunakan proses inversi yang terdiri dari sejumlah kotak persegi. *Software res2d inv* terdiri dari menu-menu sebagai berikut yang ditampilkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Tampilan Menu-Menu pada *Software Res2inv*

1. Menu File memiliki *option* yaitu seperti pada Gambar 4.7 :



Gambar 4.7 Tampilan pada menu file pada *software* Res2dinv

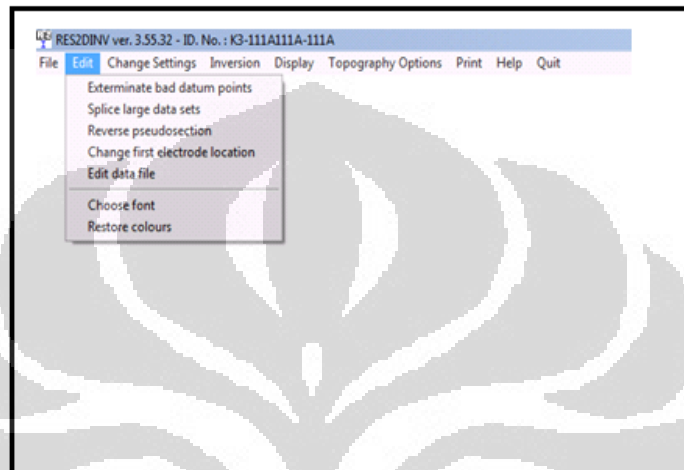
- Read Data File

Nilai *resistivity* semu harus dalam format *file text*(.dat). Data disusun dalam ASCII dimana sebuah koma atau spasi kosong bertujuan memisahkan data numerik yang berbeda. Data *input* dalam file .dat disusun sebagai berikut (Gambar 4.8) :

| Profile # | Electrode 1 | Electrode 2 | Electrode 3 | Resistivity |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 5.0000 | 1.000000 | 2.8980 |
| 1 | 10.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 31.3900 |
| 1 | 20.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 75.8820 |
| 1 | 30.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 14.1000 |
| 1 | 40.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 32.4200 |
| 1 | 50.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 26.9100 |
| 1 | 60.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 75.1000 |
| 1 | 70.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 40.3000 |
| 1 | 80.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 49.1900 |
| 1 | 90.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 525.2000 |
| 1 | 100.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 43.2400 |
| 1 | 110.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 41.7700 |
| 1 | 120.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 41.6900 |
| 1 | 130.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 37.7100 |
| 1 | 140.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 74.1800 |
| 1 | 150.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 82.1100 |
| 1 | 160.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 73.7000 |
| 1 | 170.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 43.1200 |
| 1 | 180.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 43.9100 |
| 1 | 190.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 37.4400 |
| 1 | 200.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 64.4100 |
| 1 | 210.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 62.7400 |
| 1 | 220.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 57.1700 |
| 1 | 230.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 73.0600 |
| 1 | 240.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 0 |
| 1 | 250.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 0 |
| 1 | 260.0000 | 5.0000 | 1.000000 | 0 |

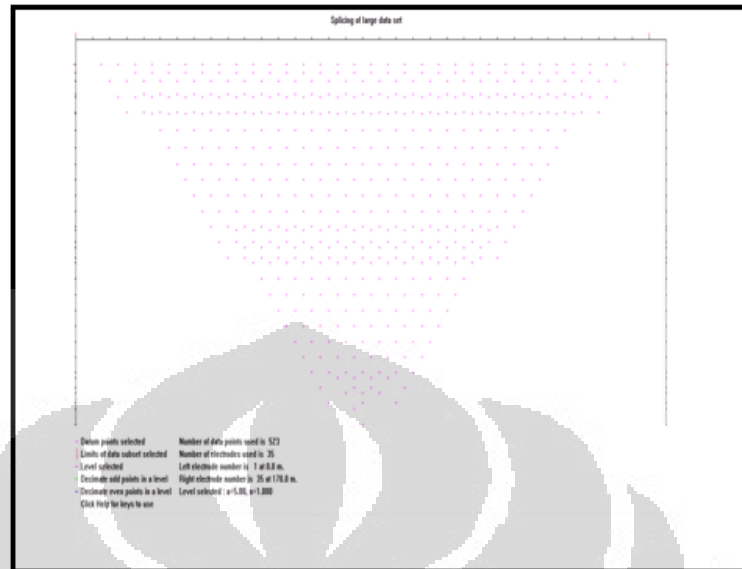
Gambar 4.8 Contoh data input lintasan pengukuran pada format .dat

2. Menu Edit data berfungsi mengubah data yang telah dimasukkan sebelumnya. Selain itu, *option* ini dapat membuang *datum point* yang buruk, dan membagi data *set* yang sangat besar. Pada Menu ini akan terlihat *option* seperti pada Gambar 4.9 :



Gambar 4.9 Tampilan menu Edit pada *software* Res2dinv

- Exterminate Bad Datum Points
option ini bertujuan menghilangkan titik-titik data yang buruk.
- Splice large data sets
Option ini berfungsi memilih penampang yang akan diinversi dari data seluruhnya. Setelah memilih *option* ini, distribusi dari datum *points* dalam sebuah *pseudosection* akan terlihat. Pada *option* ini juga dapat memilih penampang dari data set dengan tombol *arrow*. Datum *points* yang dipilih akan ditandai dengan warna ungu dan sisa datum *point* lainnya dengan warna hitam. Selain itu, jika terlalu banyak datum *point* pada level yang rendah dapat mengurangi datum *point* tersebut dengan memilih hanya datum *point* yang ganjil atau genap saja. Gambar 4.10 merupakan *contoh Splice large data sets* lintasan D.

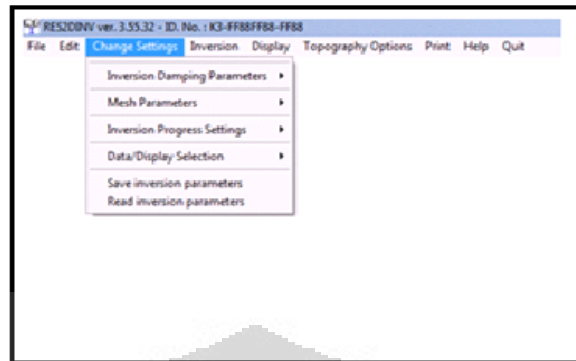


Gambar 4.10 Contoh *Splice large data sets* lintasan D

- Reverse pseudosection
Option ini akan mengembalikan *pseudosection* secara horisontal dari kiri ke kanan. Hal ini akan membantu apabila menggunakan survei yang lintasannya sejajar, tetapi survei dimulai dari arah yang berbeda.
- Change first electrode location
Option ini berfungsi mengganti lokasi dari penempatan elektroda pertama dalam satu garis survei. Hal ini bertujuan saat *plotting* sehingga garis survei akan bergeser semua ke arah nilai yang diberikan.

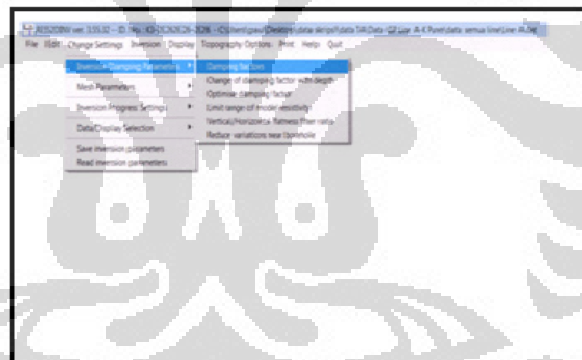
3. Menu Change Settings

Sebelum melakukan proses inversi, pengaturan awal harus ditentukan untuk faktor peredaman dan variabel-variabel inversi lainnya. Hal ini akan mengakibatkan hasil yang terbaik dengan memodifikasi parameter yang mengontrol proses inversi. Pada saat memilih menu Change settings ini akan terlihat *option* seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Tampilan menu Change settings pada *software* res2dinv

Selanjutnya, untuk menghasilkan model inversi yang baik, maka perlu memodifikasi parameter yang mengontrol proses inversi. Parameter-parameter tersebut antara lain *damping factors*, *changing of damping factor with*, *Mesh parameters* dan seterusnya seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Option-option pada *Inversi Damping Parameters* pada Res2dinv

- Damping Factors

Pada *option* ini bertujuan mengatur nilai awal faktor peredaman. Jika data memiliki banyak *noise*, maka harus menggunakan faktor *damping* yang relatif besar (sebagai contoh nilainya 0,3). Namun, pada data yang memiliki *noise* yang kecil sebaiknya menggunakan faktor *damping* awal yang lebih kecil (sebagai contoh nilainya 0,1). Proses inversi akan mengurangi faktor *damping* untuk iterasi berikutnya.

- Change of damping factor with depth
Resolusi dari metode *resistivity* menurun secara eksponensial sebanding dengan bertambahnya kedalaman. Faktor peredaman digunakan dalam metode *inverse least square* yang juga akan meningkat pada tiap lapisan bawah permukaan yang lebih dalam. Hal ini dilakukan untuk menstabilkan proses inversi.
- Mesh Parameters terdiri dari *finite mesh grid size*, *use finite element method*, dan *mesh refinement* (Gambar 4.13)

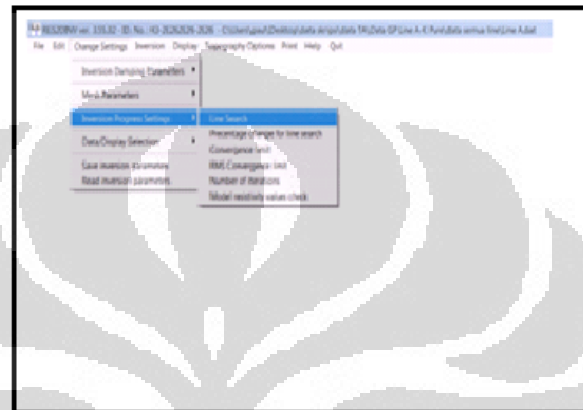


Gambar 4.13 *Mesh Parameters* pada software Res2Dinv

- Mesh Refinement
Option ini bisa diaplikasikan untuk menggunakan *finer mesh* (dalam arah vertikal) untuk metode *finite difference* atau *finite element*.
- Use finite-element method
Option ini terdapat dua metode untuk proses inversi yaitu metode *finite difference* dan *finite-element*. Pada proses inversi ini, penulis menggunakan metode *finite difference*.
- Finite mesh grid
Option ini bertujuan memilih *node* yang diinginkan per *unit electrode spacing*. Terdapat dua pilihan *node* yaitu 2 *node* dan 4 *node*.

- Inversion progress settings

Inversion progress settings terdiri dari line search, percentage change for line search, convergence limit, RMS convergence limit, number of iterations, dan model resistivity values check Gambar 4.14



Gambar 4.14 Option-option Inversion Progress Settings pada software Res2dinv

- Line Search

Proses inversi menentukan perubahan pada model parameter. Hal ini akan menghasilkan model dengan *rms error* akan meningkat, untuk kasus ini terdapat dua pilihan. Pilihan pertama adalah dengan mengambil sebuah pencarian garis menggunakan interpolasi untuk menentukan hasil optimal untuk perubahan *resistivity* dari tiap blok. Program akan mengurangi nilai *rms error* tetapi hal ini juga dapat menghasilkan ke nilai minimum lokal. Selanjutnya, pilihan kedua adalah dengan membiarkannya dan berharap bahwa iterasi berikutnya akan menghasilkan *rms error* yang lebih kecil. Hal ini juga dapat menghasilkan ke nilai minimum lokal, tetapi juga dapat meningkatkan *rms error*.

- Number of iterations

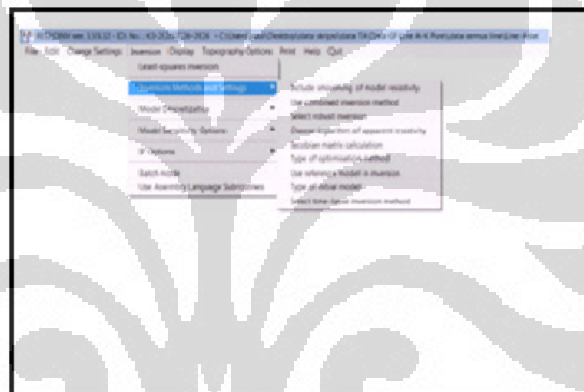
Option ini digunakan untuk menentukan nilai maksimum dari proses iterasi.

- Convergence limit

Option ini berfungsi menurunkan limit untuk perubahan relatif dalam *rms error* setelah beberapa iterasi. Secara *default*, nilai yang digunakan adalah 5%. Pada *option* ini perubahan *rms error* digunakan untuk menghasilkan data set yang berbeda dengan tingkat *noise* yang berbeda.

4. Menu Inversion

Pada menu ini akan melakukan proses inversi data *set* yang telah dibaca sebelumnya. Pada menu ini akan menampilkan *option* seperti pada Gambar 4.15 :



Gambar 4.15 Tampilan Menu Inversion pada Res2dinv

- Jacobian matrix calculation

Option ini memiliki tiga pilihan saat kalkulasi data matrik Jacobian . Metode tercepat adalah menggunakan metode Quasi-Newton.

- Include smoothing of model resistivity

Pada *option* ini akan menghasilkan sebuah model dengan variasi *smooth* pada model inversi nilai *resistivity*.

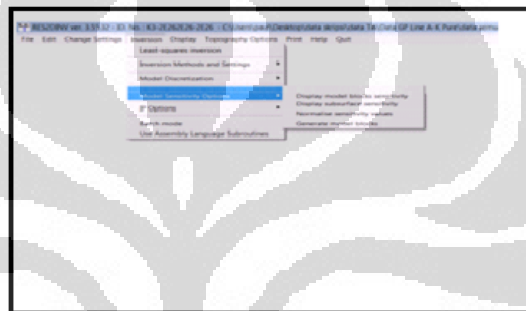
- Use combined inversion model

Pada *option* ini terdapat pilihan menggunakan *combine Marquardt* dan *Occam inversion* dalam proses inversi atau tidak menggunakannya. Penggunaan *combine Marquardt* dan *Occam inversion* bertujuan memberikan

model inversi yang lebih baik untuk objek di bawah permukaan seperti *cave* dan *ore body*. Dalam proses inversi, penulis menggunakan *combine Marquardt* dan *Occam inversion*.

- Model sensitivity option

Option ini untuk menampilkan model *sensitivity* objek di bawah permukaan yang terdiri dari display model blocks sensitivity, display subsurface sensitivity, normalize sensitivity values, dan generate model blocks (Gambar 4.16)



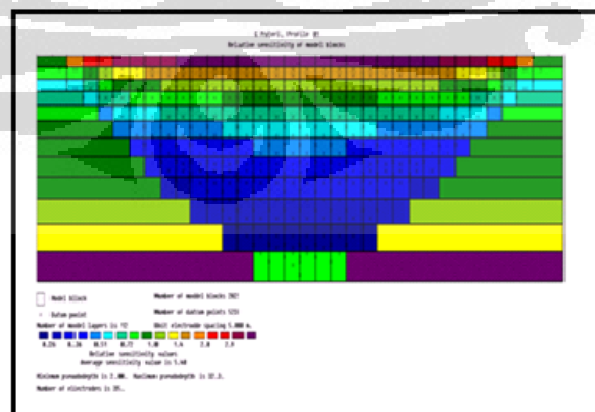
Gambar 4.16 Model *sensitivity options* pada software Res2dinv

- Display model blocks

Option ini akan membagi model *subsurface* menjadi sejumlah kotak persegi.

- Display subsurface sensitivity

Option ini akan menunjukkan plot dari sensitivitas *block* (Gambar 4.17) yang digunakan dalam model inversi.

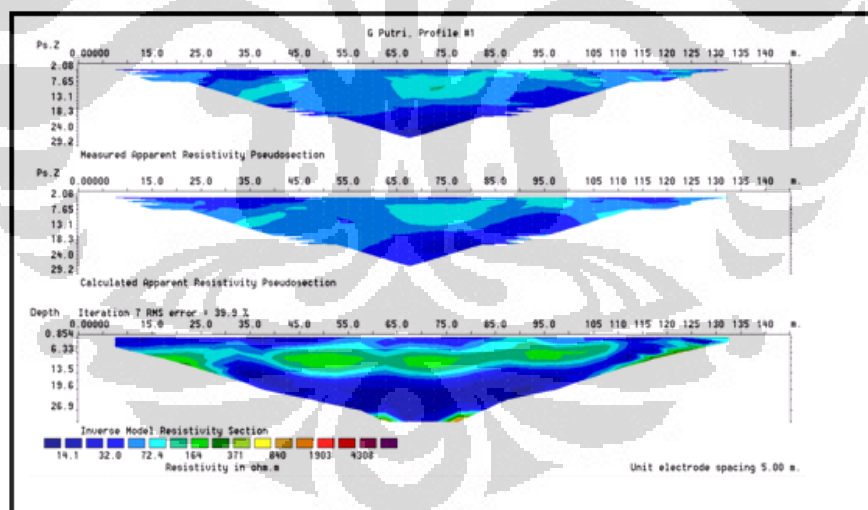


Gambar 4.17 Contoh *Display Subsurface Sensitivity Block* lintasan D

Gambar 4.17 merupakan tampilan *display subsurface sensitivity block* lintasan D. *Number of model blocks* pada lintasan D adalah 282 dan *number of datum points* adalah 523. Lintasan D memiliki *number of model layers* 12 dan jumlah elektroda yang digunakan adalah 35. Nilai relatif *sensitivity block* minimum dan maksimum pada lintasan D yaitu 0,26 dan 2,9.

4.2.1 Hasil Inversi Model 2D Resistivity Tiap – Tiap Lintasan

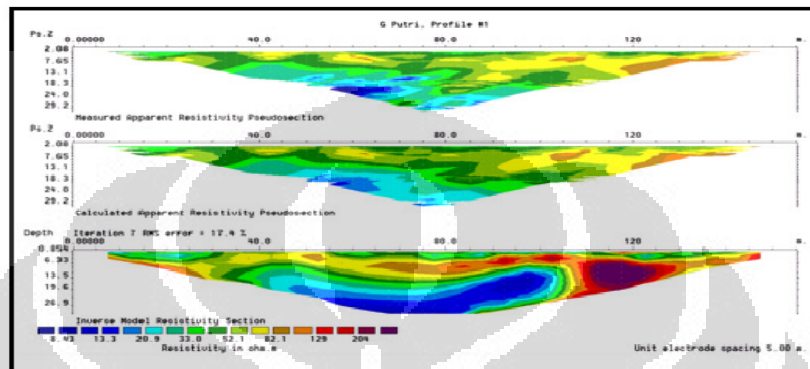
Hasil inversi Model dua dimensi semua lintasan ditampilkan dalam tiga *section* yaitu *measured apparent resistivity pseudosection*, *calculated apparent resistivity pseudosection*, dan *inverse model resistivity section*. Model yang merepresentasikan kondisi *subsurface* adalah *inverse model resistivity section* dimana pada setiap model ini memiliki nilai *rms error* yang didapat dari selisih antara *apparent resistivity pseudosection* dengan *calculated apparent resistivity pseudosection*.



Gambar 4.18 Model 2D penampang *resistivity* lintasan A

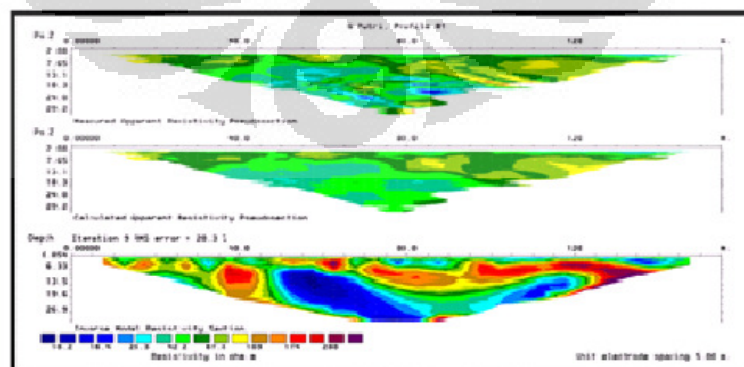
Gambar 4.18 merupakan model inversi 2D pada lintasan A. Total *number of data points* pada lintasan A adalah 327. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan A adalah 4,72 ohm.meter dan 11967,02 ohm.meter. *average sensitivity* pada

lintasan ini sebesar 4,727. Model inversi lintasan A memiliki 12 *layers* dan 204 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 145 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 35 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 7 dengan *rms error* 39,9%.



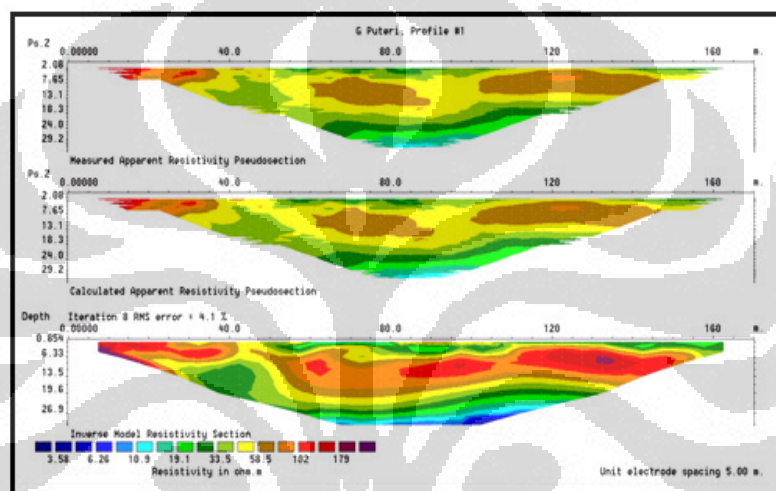
Gambar 4.19 Model 2D penampang *resistivity* lintasan B

Gambar 4.19 merupakan model inversi 2D pada lintasan B. Total *number of data points* pada lintasan B adalah 424. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan B adalah 7,52 ohm.meter dan 360,32 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 5,273. Model inversi lintasan B memiliki 12 *layers* dan 243 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 155 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 35 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 7 dengan *rms error* 17,4%.



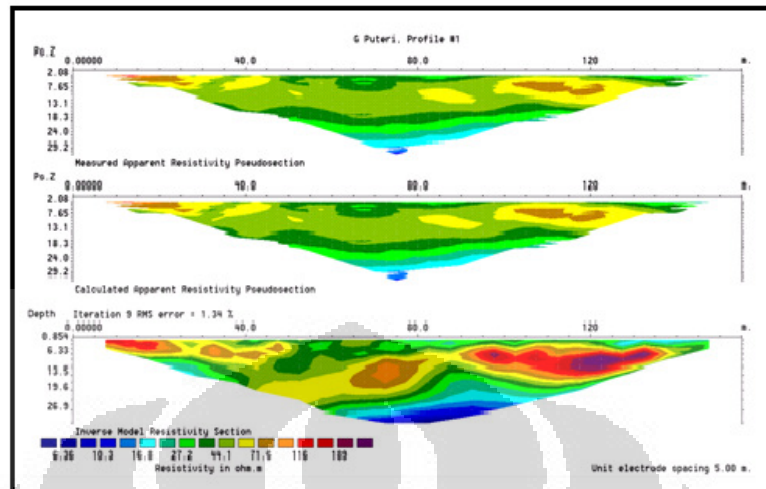
Gambar 4.20 Model 2D penampang *resistivity* lintasan C

Gambar 4.20 merupakan model inversi 2D pada lintasan C. Total *number of data points* pada lintasan C adalah 408. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan B adalah 9,08 ohm.meter dan 505,46 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 5,249. Model inversi lintasan C memiliki 12 layers dan 245 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 155 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 35 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 7 dengan *rms error* 20,3 %.



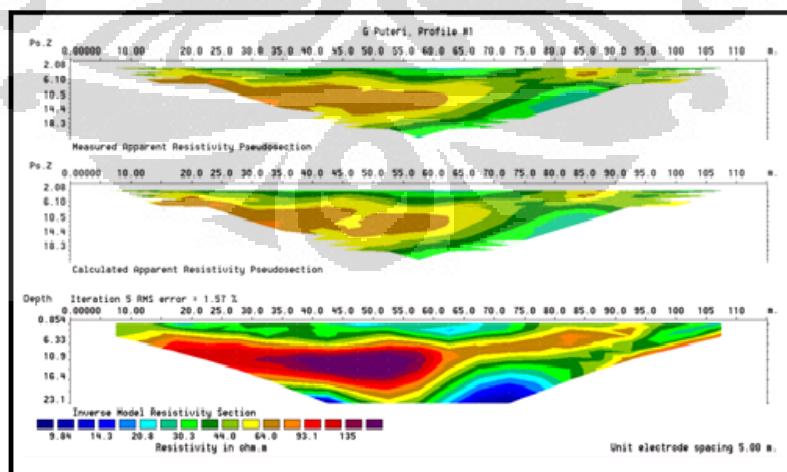
Gambar 4.21 Model 2D penampang *resistivity* lintasan D

Gambar 4.21 merupakan model inversi 2D pada lintasan D. Total *number of data points* pada lintasan D adalah 523. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan D adalah 3,11 ohm.meter dan 359,91 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 5,689. Model inversi lintasan D memiliki 12 *layers* dan 282 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 170 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 40 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 8 dengan *rms error* 4,1 %.



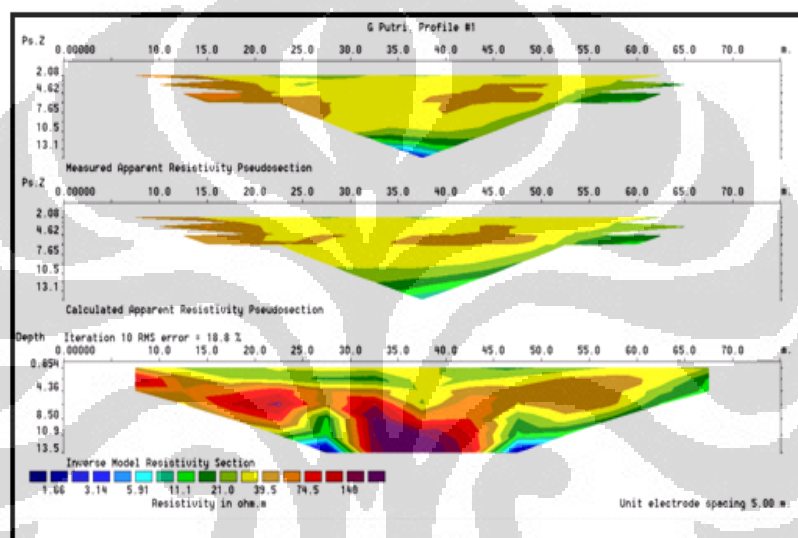
Gambar 4.22 Model 2D penampang *resistivity* lintasan E

Gambar 4.22 merupakan model inversi 2D pada lintasan E. Total *number of data points* pada lintasan E adalah 427. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan E adalah 5,64 ohm.meter dan 345,29 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 5,525. Model inversi lintasan E memiliki 12 *layers* dan 240 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 155 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 35 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 9 dengan *rms error* 1,34 %.



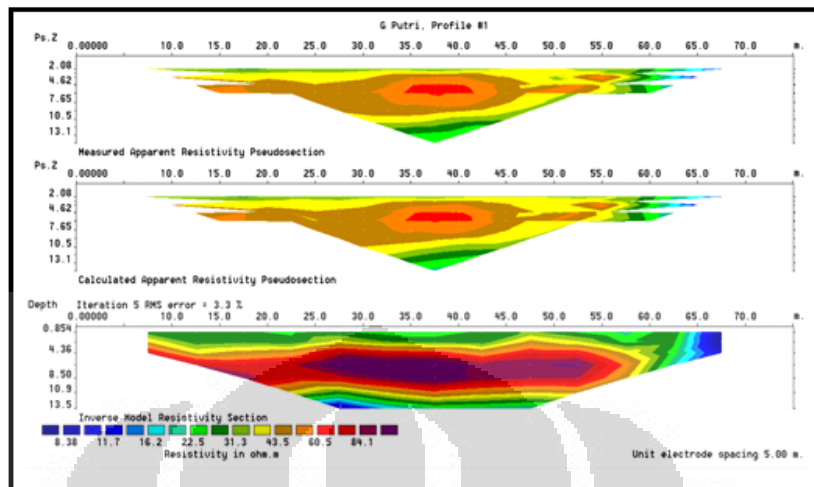
Gambar 4.23 Model 2D penampang *resistivity* lintasan F

Gambar 4.23 merupakan model inversi 2D pada lintasan F. Total *number of data points* pada lintasan F adalah 230. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan F adalah 8,96 ohm.meter dan 216,17 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 4,246. Model inversi lintasan F memiliki 10 *layers* dan 154 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 115 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 28 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 5 dengan *rms error* 1,57 %.



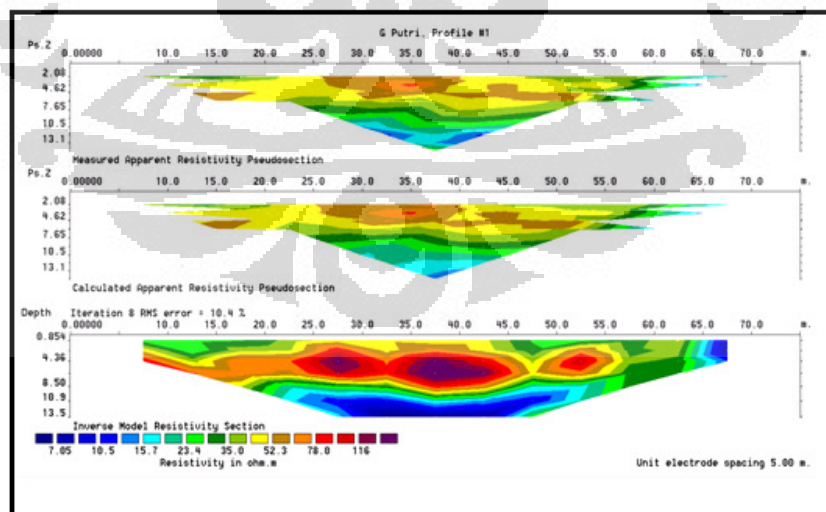
Gambar 4.24 Model 2D penampang *resistivity* lintasan G

Gambar 4.24 merupakan model inversi 2D pada lintasan G. Total *number of data points* pada lintasan G adalah 90. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan G adalah 1,42 ohm.meter dan 309,91 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 4,246. Model inversi lintasan G memiliki 7 *layers* dan 71 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 75 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 15 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 10 dengan *rms error* 18,8 %.



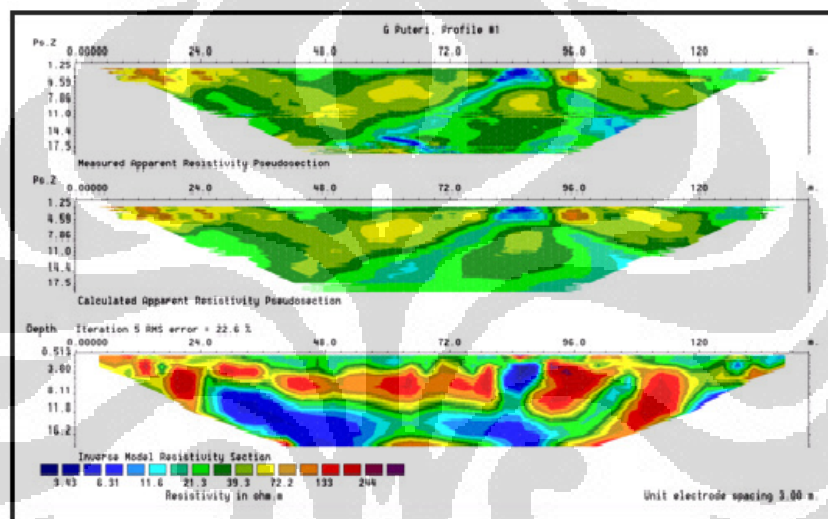
Gambar 4.25 Model 2D penampang *resistivity* lintasan H

Gambar 4.25 merupakan model inversi 2D pada lintasan H. Total *number of data points* pada lintasan H adalah 87. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan H adalah 7,72 ohm.meter dan 127,02 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 3,228. Model inversi lintasan H memiliki 7 *layers* dan 71 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 75 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 15 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 5 dengan *rms error* 3,3



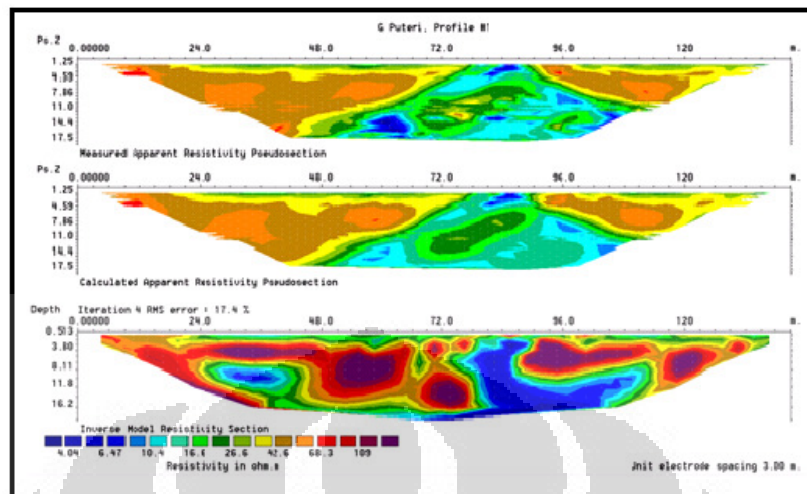
Gambar 4.26 Model 2D penampang *resistivity* lintasan I

Gambar 4.26 merupakan model inversi 2D pada lintasan I. Total *number of data points* pada lintasan I adalah 86. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan I adalah 6,38 ohm.meter dan 192,18 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 3,330. Model inversi lintasan I memiliki 7 *layers* dan 71 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 75 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 15 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 8 dengan *rms error* 10,4 %.



Gambar 4.27 Model 2D penampang *resistivity* lintasan J

Gambar 4.27 merupakan model inversi 2D pada lintasan J. jarak antara elektroda pada lintasan ini adalah 3 meter. Total *number of data points* pada lintasan J adalah 895. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan J adalah 2,95 ohm.meter dan 522,59 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 6,656. Model inversi lintasan J memiliki 12 *layers* dan 438 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 140 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 25 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 5 dengan *rms error* 22,6 %.



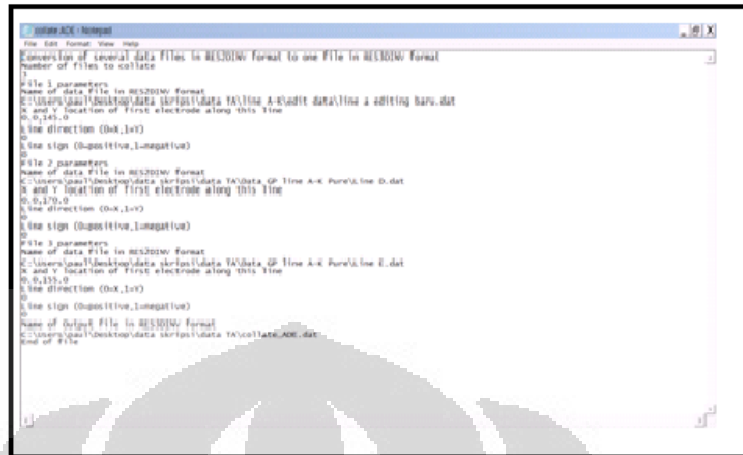
Gambar 4.28 Model 2D penampang *resistivity* lintasan K

Gambar 4.28 merupakan model inversi 2D pada lintasan K. jarak antara elektroda pada lintasan ini adalah 3 meter. Total *number of data points* pada lintasan K adalah 834. Nilai *resistivity* minimum dan maximum pada lintasan J adalah 3,59 ohm.meter dan 197,33 ohm.meter. *average sensitivity* pada lintasan ini sebesar 6,364. Model inversi lintasan K memiliki 12 *layers* dan 419 *blocks*. Panjang lintasan ini adalah 140 meter dengan *depth of investigation* adalah sekitar 25 meter. *Number of iteration* yang digunakan adalah sebanyak 4 dengan *rms error* 17,4 %.

4.3 Software Res3dinv

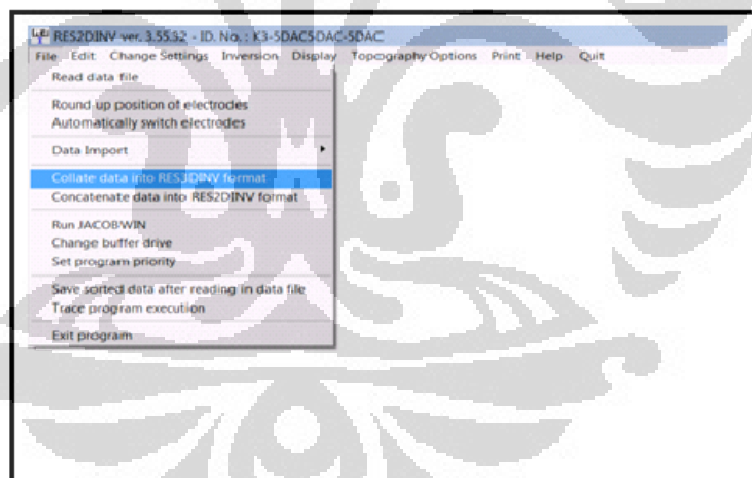
Data *resistivity* yang telah diinversi untuk mendapatkan model 2D hasil inversi kemudian disortir untuk melakukan proses inversi 3D menggunakan *software* Res3dinv. Tahapan-tahapan proses data pada *software* Res3dinv yaitu :

- Membuat *collate* untuk menggabungkan data-data lintasan (minimal 3 lintasan). Proses ini dapat dilakukan di program *notepad* sebagai berikut (gambar 4.29).



Gambar 4.29 Membuat *collate* pada program *notepad* untuk menggabungkan lintasan-lintasan

- File → *collate* data into Res3dinv format : tahapan ini dilakukan untuk mengubah *output collate* dari format .txt menjadi .dat. proses ini dilakukan pada *software* Res2dinv (gambar 4.30).



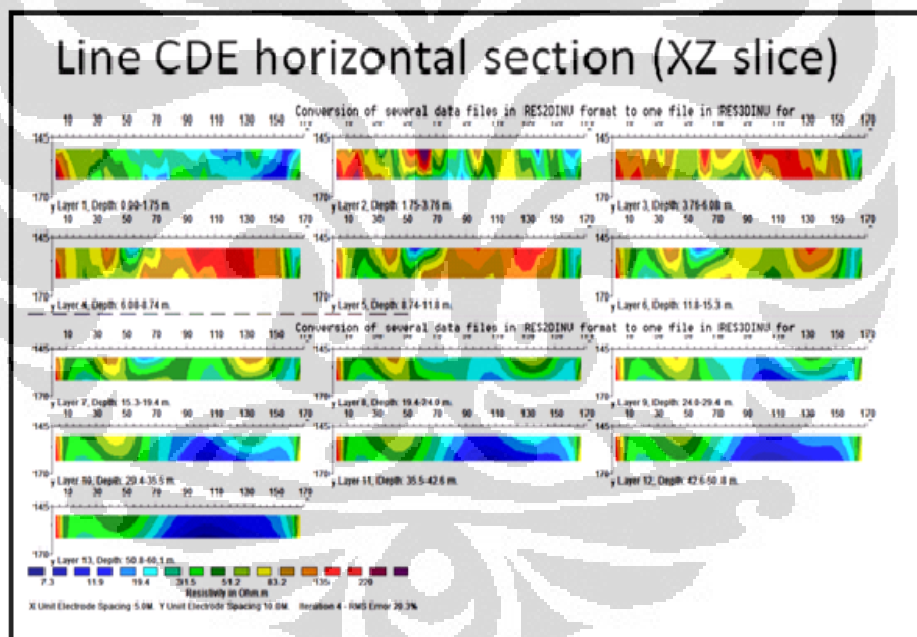
Gambar 4.30 *Collate* data into Res3dinv format

- Setelah melakukan *collate* pada Res2dinv, maka tahap selanjutnya pada *software* Res3dinv File → read data file. Pada proses ini memasukkan data berupa *file* dengan nama *file* Collate c.dat
- Inversion → carry out inversion : Proses ini melakukan inversi dengan jumlah iterasi tertentu.

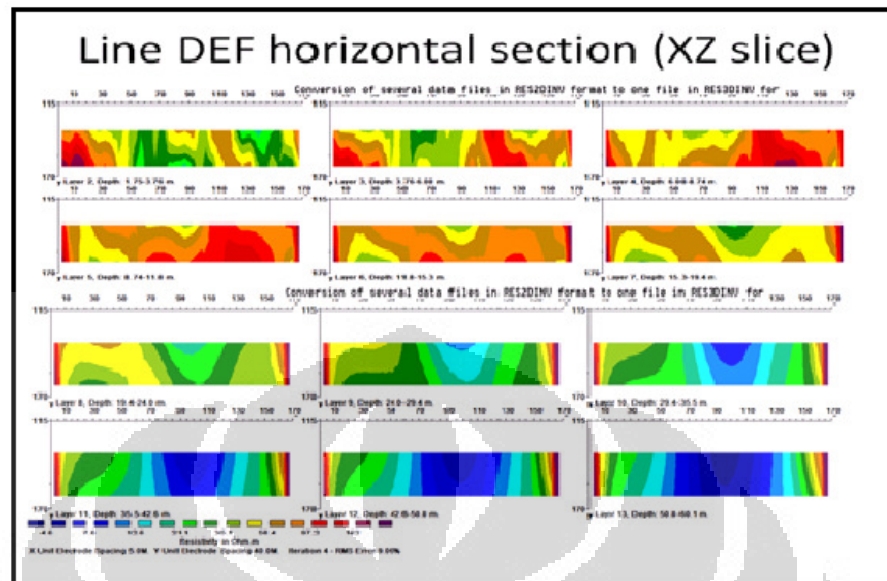
- Display → display results : proses ini dilakukan untuk mengetahui jumlah iterasi yang telah dilakukan dan nilai rms error yang diperoleh dari hasil iterasi tersebut.
- Display → display inversi model : proses ini bertujuan menampilkan penampang *resistivity* yang telah di inversi.

4.3.1 Model 3D *resistivity* Penampang sumbu XZ

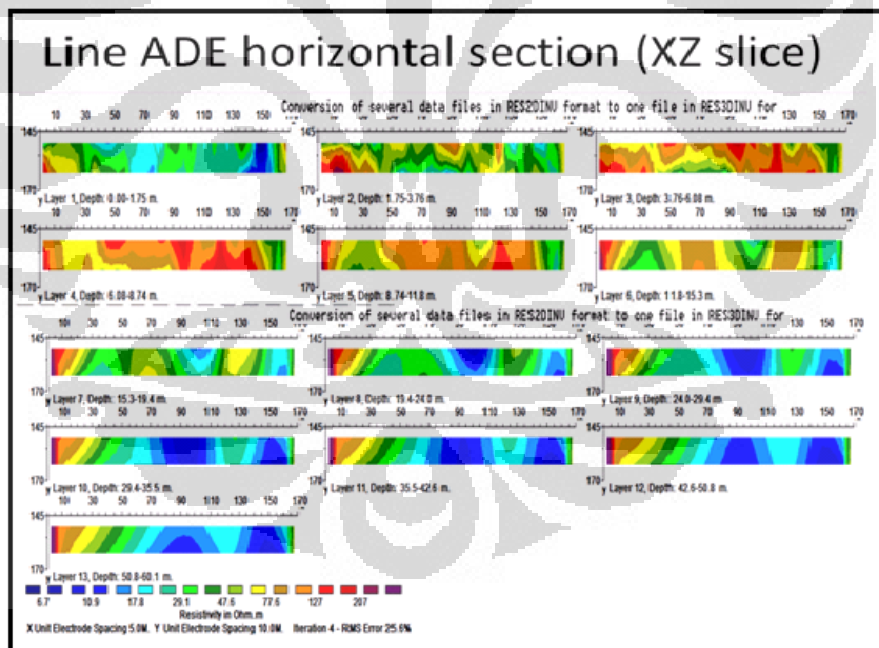
Hasil inversi model *resistivity* 3D ditampilkan dalam bentuk penampang sumbu XZ. Maksudnya adalah model *resistivity* yang ditampilkan hanya bagian sumbu x dan sumbu z, dimana *profile* dari model *resistivity* yang ada diasumsikan memiliki nilai yang konstan pada sumbu y.



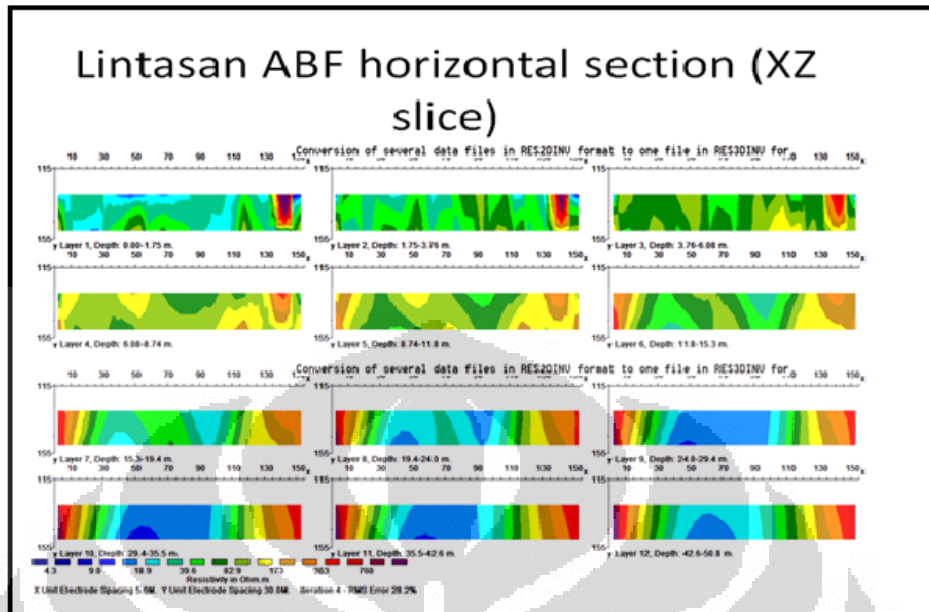
Gambar 4.31 Model *resistivity horizontal section* Lintasan CDE dalam bidang XZ



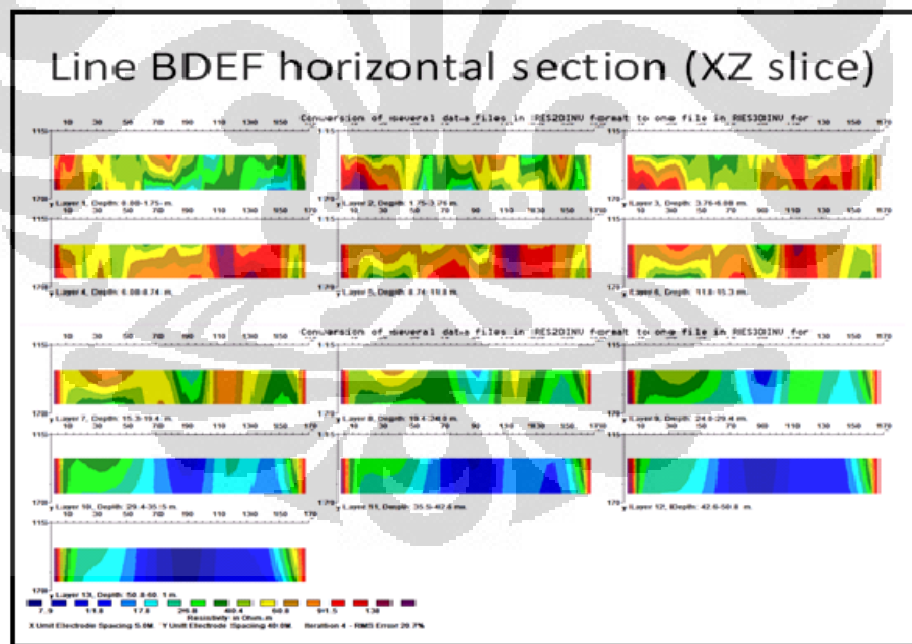
Gambar 4.32 Model *resistivity horizontal section* Lintasan DEF dalam bidang XZ



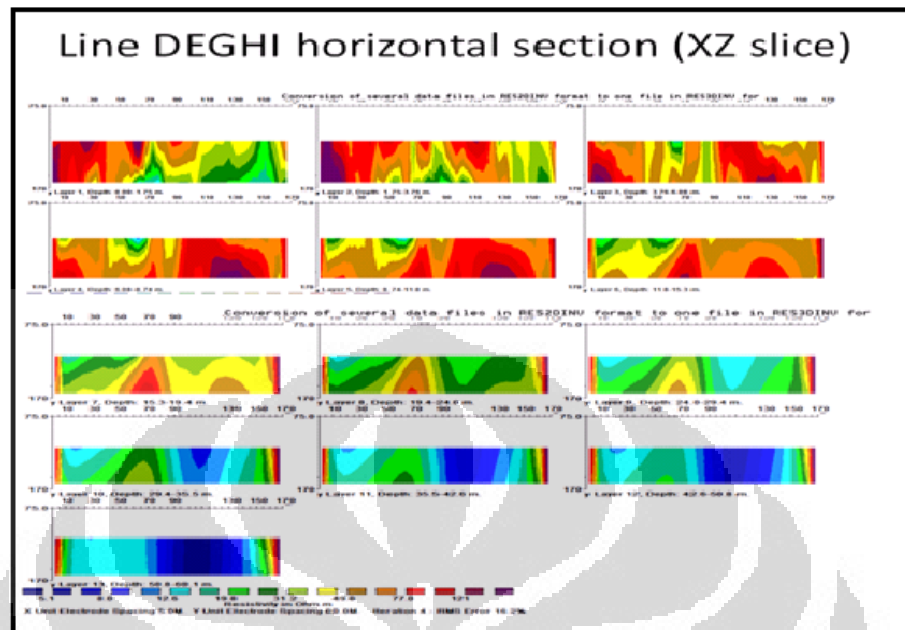
Gambar 4.33 Model *resistivity horizontal section* Lintasan ADE dalam bidang XZ



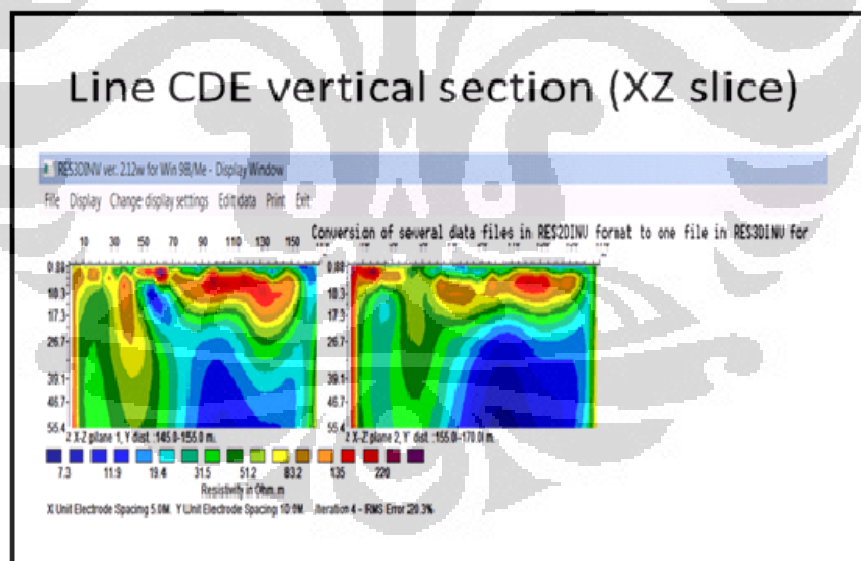
Gambar 4.34 Model resistivity horizontal section Lintasan ABF dalam bidang XZ



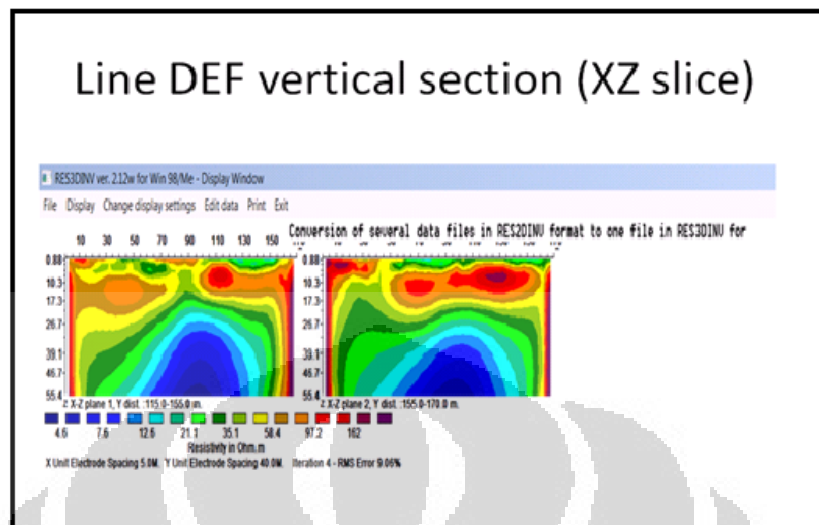
Gambar 4.35 Model resistivity horizontal section Lintasan BDEF dalam bidang XZ



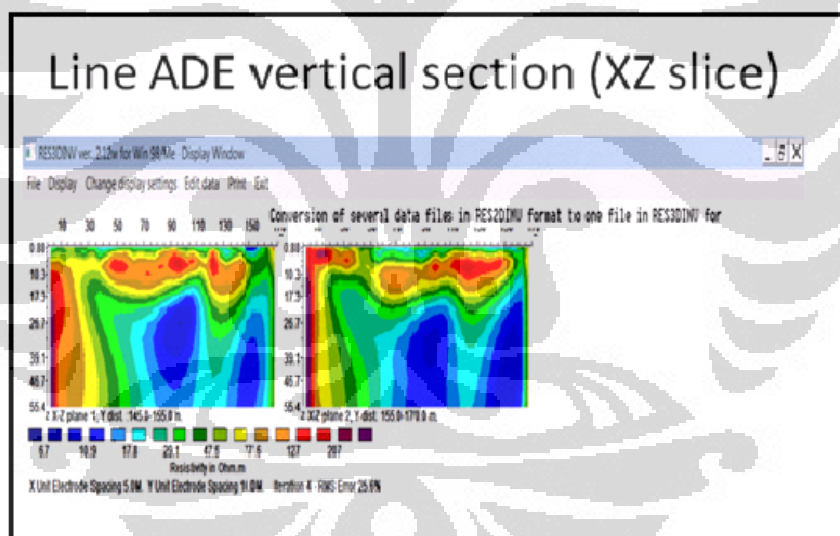
Gambar 4.36 Model resistivity horizontal section Lintasan DEGHI dalam bidang XZ



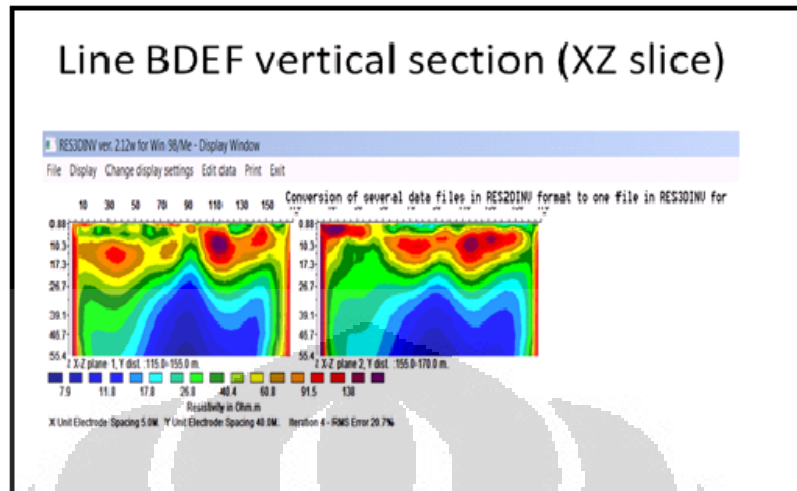
Gambar 4.37 Model resistivity vertical section Lintasan CDE dalam bidang XZ



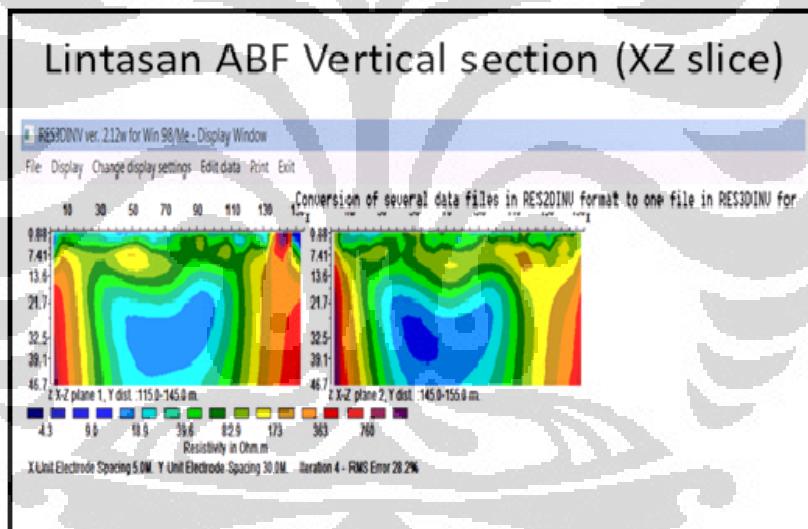
Gambar 4.38 Model *resistivity vertical section* Lintasan DEF dalam bidang XZ



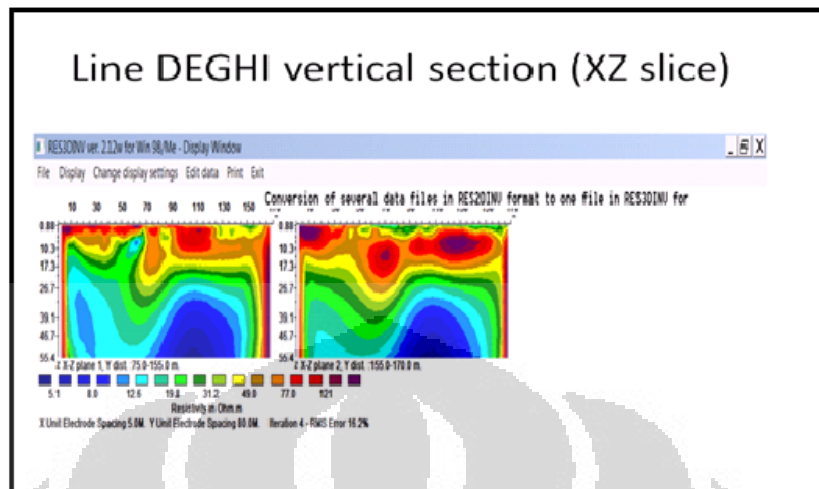
Gambar 4.39 Model *resistivity vertical section* Lintasan ADE dalam bidang XZ



Gambar 4.40 Model *resistivity vertical section* Lintasan BDEF dalam bidang XZ



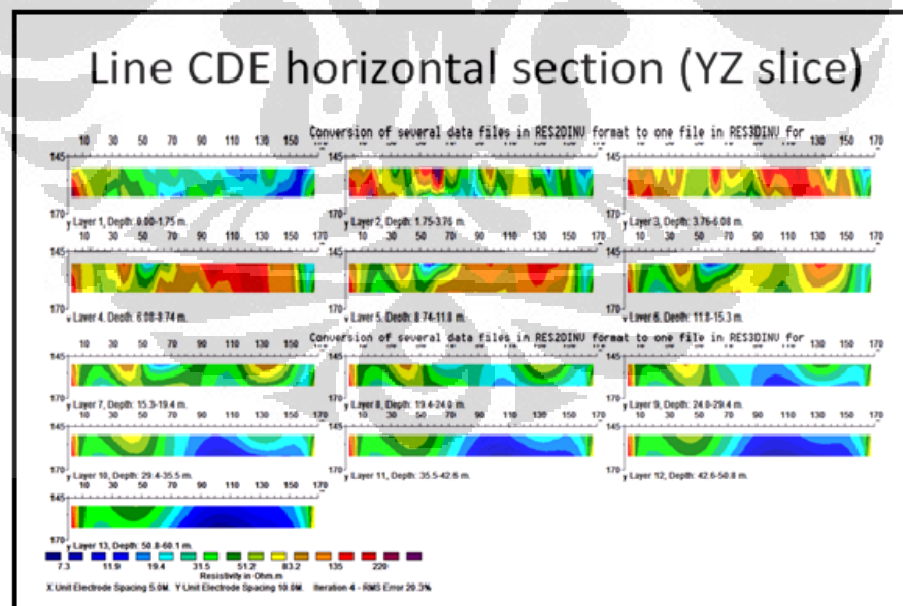
Gambar 4.41 Model *resistivity vertical section* Lintasan ABF dalam bidang XZ



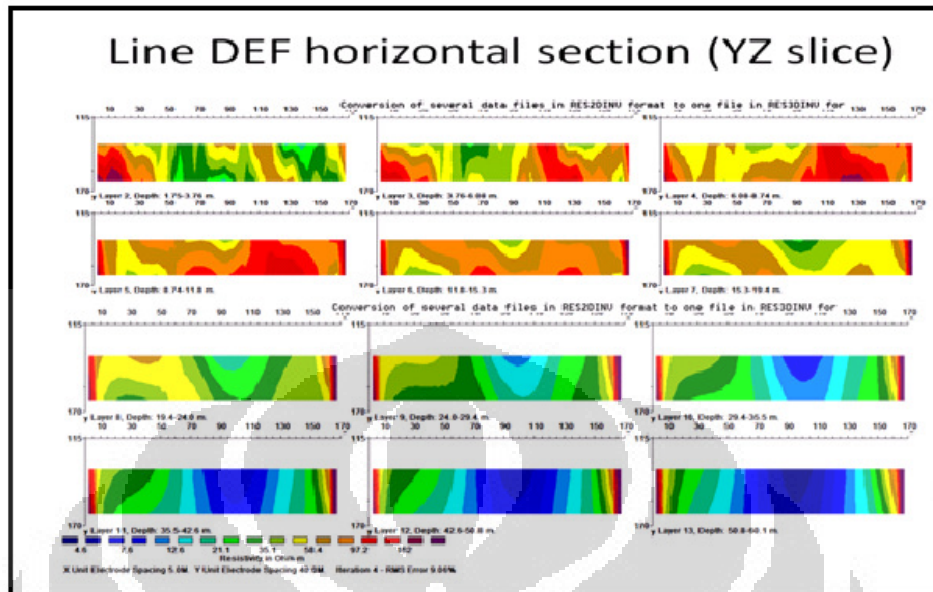
Gambar 4.42 Model *resistivity vertical section* Lintasan DEGHI dalam bidang XZ

4.3.2 Model 3D *resistivity* Penampang sumbu YZ

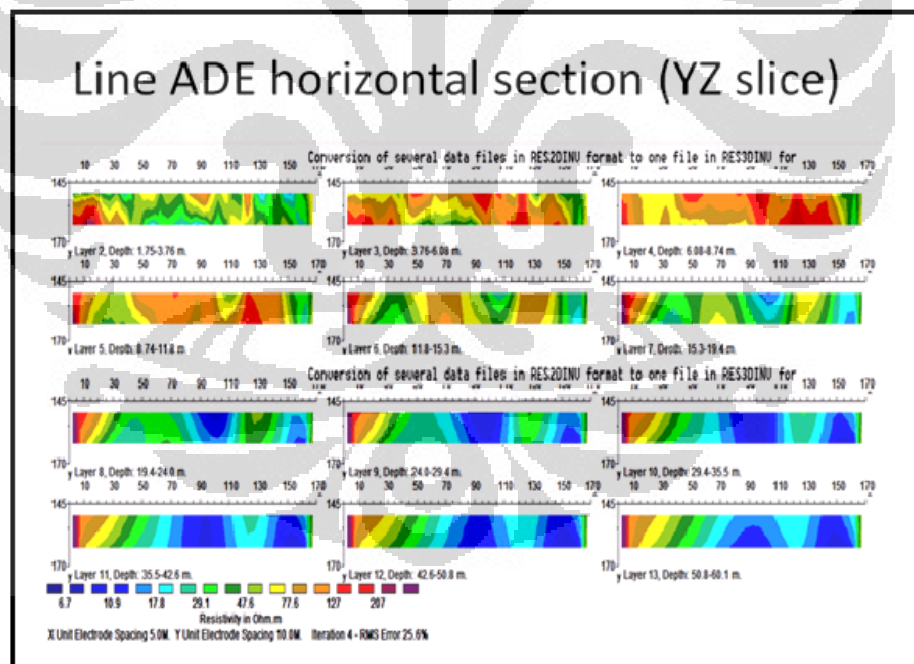
Model resistivitas hasil inversi kemudian ditampilkan dalam sumbu Y dan Z dimana dianggap profil nilai resistivitas pada sumbu X adalah konstan.



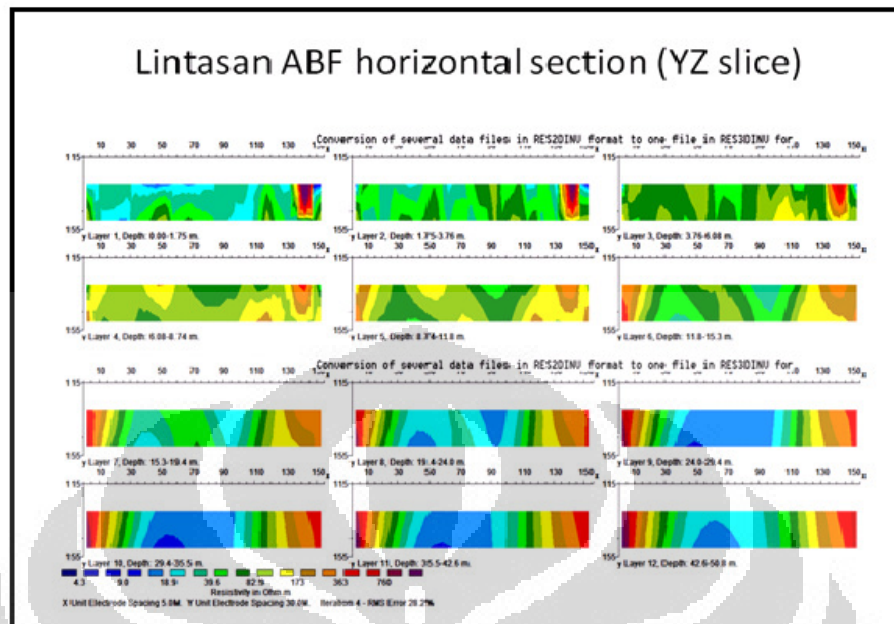
Gambar 4.43 Model *resistivity horizontal section* Lintasan CDE dalam bidang YZ



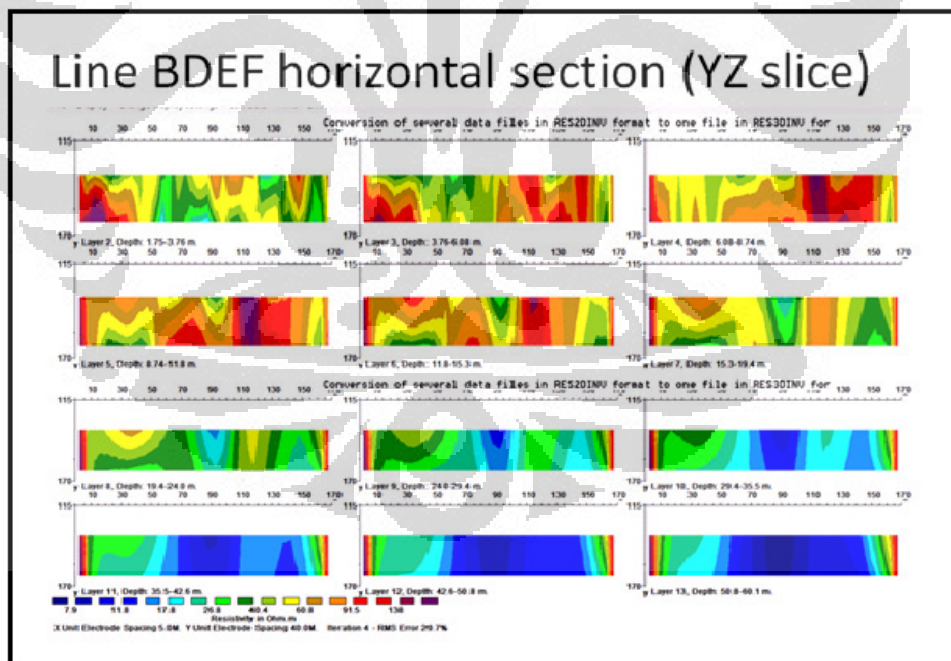
Gambar 4.44 Model *resistivity horizontal section* Lintasan DEF dalam bidang YZ



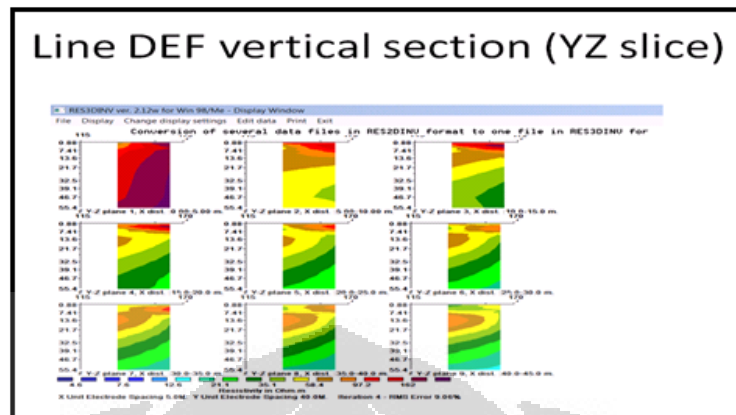
Gambar 4.45 Model *resistivity horizontal section* Lintasan ADE dalam bidang YZ



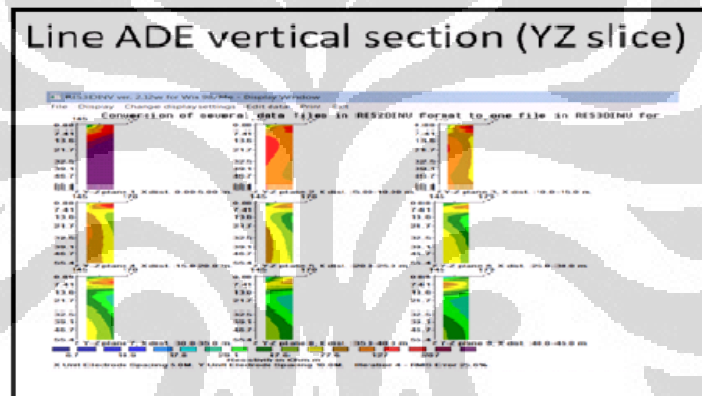
Gambar 4.46 Model *resistivity horizontal section* Lintasan ABF dalam bidang YZ



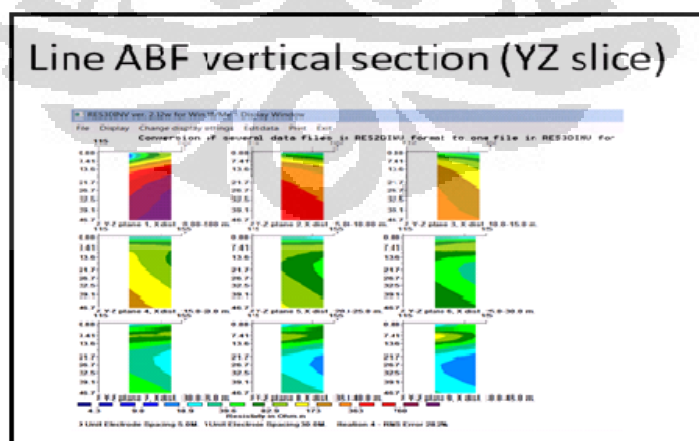
Gambar 4.47 Model *resistivity horizontal section* Lintasan BDEF dalam bidang YZ



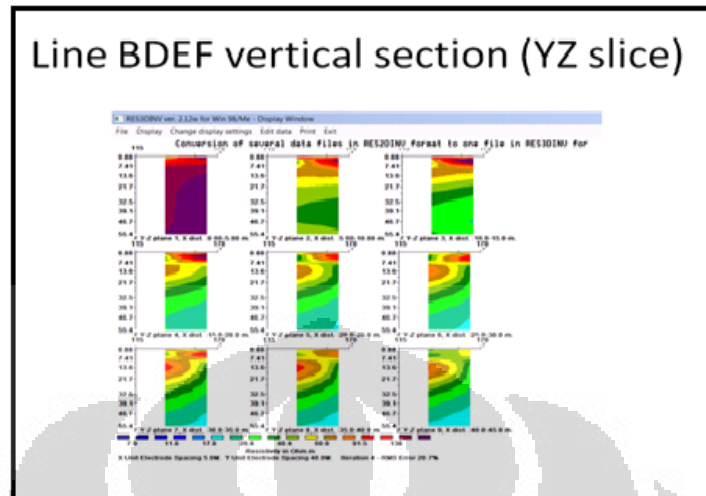
Gambar 4.50 Model *resistivity vertical section* Lintasan DEF dalam bidang YZ



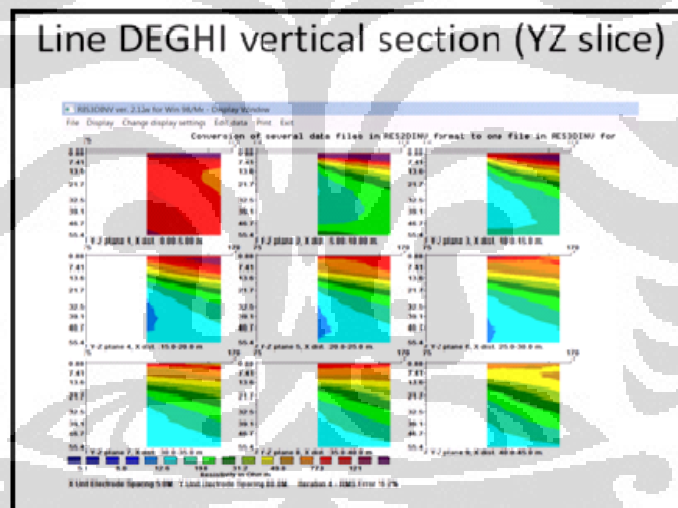
Gambar 4.51 Model *resistivity vertical section* Lintasan ADE dalam bidang YZ



Gambar 4.52 Model *resistivity vertical section* Lintasan ABF dalam bidang YZ



Gambar 4.53 Model *resistivity vertical section* Lintasan BDEF dalam bidang YZ



Gambar 4.54 Model *resistivity vertical section* Lintasan DEGHI dalam bidang YZ

4.4 Software GeoSlicer-X

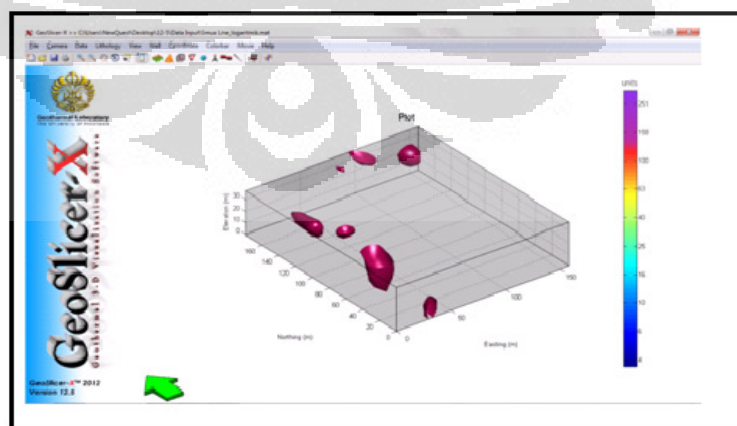
Penulis melakukan pemodelan tiga dimensi menggunakan *software* Geoslicer-X dengan menggabungkan hasil dua dimensi *resistivity* tiap-tiap lintasan ke dalam sebuah *cube* yang kemudian diinterpolasi. Data masukan yang diperlukan untuk membuat pemodelan tiga dimensi ini terdiri dari tiga *file* dalam bentuk .txt dan satu

file dalam bentuk *.bmp*. Sebelum membuat bentuk 3D dari distribusi *resistivity*, terdapat beberapa komponen *input* yang harus dibuat dalam format *.txt* yaitu:

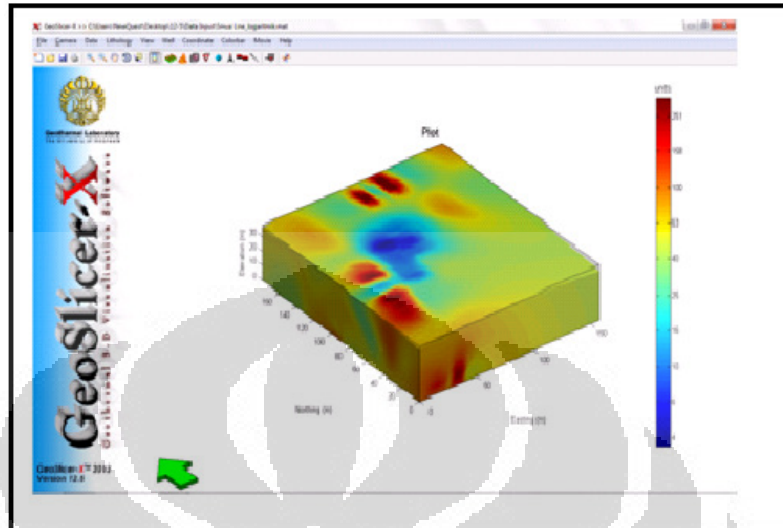
- Data koordinat *x dummy*, elevasi, nilai *resistivity* dan koordinat pada titik awal dan akhir pengukuran dari masing-masing line. Data ini diperoleh dari output hasil inversi program *res2dinv* yang disimpan dalam *format.xyz*.
- Data topografi dan koordinat dari semua line .
- Boundary sebagai batas minimum dan maksimum dari koordinat dan elevasi dari semua titik pengukuran.
- Gambar dalam format *.bmp* berupa peta lokasi pengukuran.

Setelah membuat *input-input* tersebut, maka tahapan selanjutnya adalah memasukkan *input* tersebut ke *software* Geoslicer-X dengan tahapan sebagai berikut :

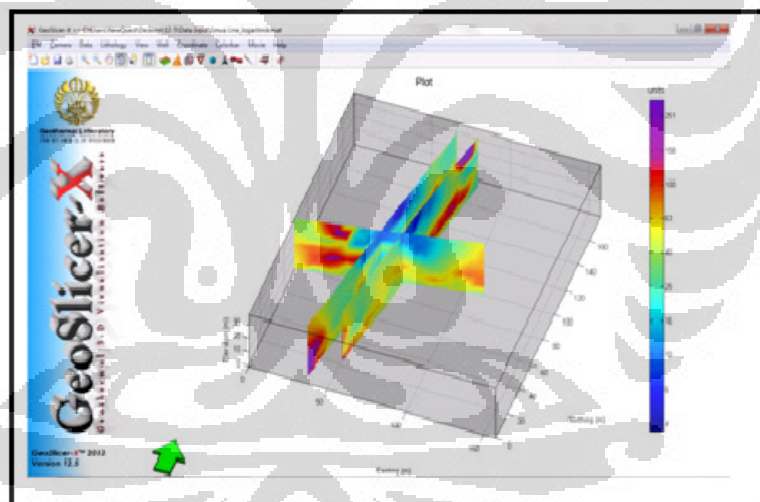
- Data 2d to 3d proses ini dilakukan dengan memasukkan data pada poin a yang telah dijelaskan sebelumnya persatu sebelum dimasukkan ke dalam data masing-masing. Setelah itu *save* hasil inputnya,
- Data gridding : pada langkah ini dilakukan input terhadap hasil *output* dari langkah sebelumnya, data topografi, gambar dan boundary. Setelah itu *software* akan melakukan proses gridding dan hasilnya disimpan dalam format *.mat*.
- Open file *.mat* : pada tahapan ini dibuka data hasil output dari proses *gridding*.



Gambar 4.55 Anomali isovalue 130 Ohm-m.



Gambar 4.56 Penampang *cube* hasil interpolasi.



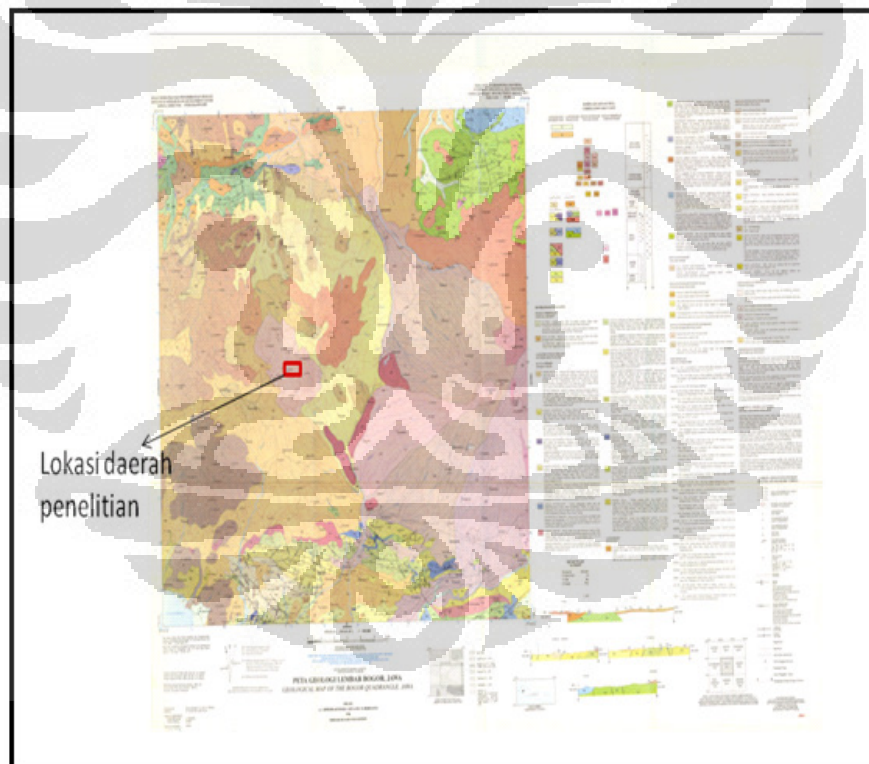
Gambar 4.57 *Slice* Lintasan D, E, dan F

BAB 5

INTERPRETASI DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Geologi Lokal Daerah Penelitian

Dalam melakukan interpretasi geofisika dibutuhkan data pendukung lainnya, seperti data geologi lokal daerah penelitian, data sumur, sampel batuan, dan data-data lain. Karena tanpa data geologi lokal, maka hasil pengolahan data geofisika akan mengalami ambiguitas sehingga akan mempersulit interpretasi hasil pengolahan data geofisika dan juga menyebabkan tidak terlihat objek yang ingin dicari (Daniel,2009). Oleh sebab itu, dengan menggabungkan data geologi dan data *resistivity* diharapkan dapat melokalisir keberadaan zona *cavity* di bawah permukaan.



Gambar 5.1 Peta Geologi Lembar Bogor

5.1.1 Geologi Umum Wilayah Bogor

Formasi geologi daerah Bogor didominasi oleh formasi konglomerat dan batupasir tufaan atau kipas alluvium (Qav) yang berumur pleistosen. Formasi ini terdiri dari tuf halus, berlapis, tuf pasiran berselingan dengan tuf konglomeratan. Formasi Qav terletak di bagian utara daerah Bogor dengan luasan 57.293,103 ha (18,14 % dari luasan daerah Bogor). Formasi Qav terdiri dari tuf halus, berlapis, tuf pasiran berselingan dengan tuf konglomeratan. Formasi ini terdistribusi di bagian timur laut dan berdampingan dengan formasi endapan sungai, rawa dan pantai (Qa) yang terdiri dari lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal dan bongkah. Formasi endapan batu pasir konglomeratan dan batu lanau (Qoa) terdiri dari batu pasir konglomeratan, batu lanau, dan batu pasir. Formasi Qa dan Qoa menyebar di bagian timur daerah Penelitian Bogor.

Formasi Genteng dijumpai di bagian utara sampai barat laut. Formasi genteng (Tpg) terdiri dari tuf berbatu apung, batu pasir tufan, konglomerat, breksi andesit dan sisipan lempung tufan. Tuf berbatu apung memiliki morfologi putih sampai kelabu, berbutir halus sampai kasar, bersusunan menengah sampai kasar. Batu pasir tufan berwarna kelabu kehijauan, mengandung glaukonit, berbutir menengah sampai kasar. Konglomerat berwarna kelabu tua, agak padat, komponennya terutama adalah andesit dengan massa dasar pasir tufaan, lempung tufaan yang berwarna kelabu kehijauan. Formasi Kelapanunggal (Tmk) terdistribusi di bagian timur laut. Formasi Tmk ini terdiri dari batu gamping koral, sisipan batu gamping pasiran, napal, dan batu pasir kuarsa plokonitan hijau.

Di bagian timur terdapat formasi Jatiluhur yang terdiri dari napal dan batu lempung dengan sisipan batu pasir gampingan. Selain itu, dibagian ini terdapat pula satuan batuan andesit homblenda dan porfir diorite (ha) dan satuan batuan terobosan mangerit (ma), formasi Qos yang terdiri dari batu pasir tufaan dan konglomerat, serta formasi Catayan yang terdistribusi di bagian tenggara.

Wilayah bagian selatan didominasi oleh formasi Qvpo yang berada dalam kontak dengan formasi Qvsb dan Qvst. Formasi batuan gunung api Endut (Qpv) yang berumur pleistosen terdapat di bagian barat daya. Sementara itu, di bagian barat terdapat formasi Tmbs, Tmbl, Tmbc yang menyatu dengan anggota formasi Bojongmanik (Tmbs: batu pasir; Tmbl: batu gamping; Tmbc: batu lempung) dan Tma (andesit) yang berumur pliosen akhir.

Di bagian barat laut terdapat formasi batuan sedimen Tpg (Formasi Genteng: Tuf batu apung: batu pasir tufaan, breksi konglomerat, napal dan kayu terkarsikan), formasi Bojongmanik (Tmb) yang merupakan perselingan batu pasir dengan lempung, sisipan batu gamping dan berumur meiosen. Terdapat juga batuan terobosan Tba (andesit) dan batuan endapan permukaan Qa yang berumur pliosen.

5.1.2 Stratigrafi Wilayah Bogor

Van Bemmelen (1970) telah mengklasifikasikan stratigrafi wilayah Bogor bagian tengah dan timur dengan batuan tertua Anggota Pemali Bawah yang berumur oligosen sampai meiosen bawah, dengan hasil petunjuk foraminifera besar *Spiroclypeus* sp. Ciri litologinya adalah perlapisan batu lempung, napal, serpih dengan sisipan batupasir kuarsa dan batu gamping.

Di atas formasi itu diendapkan batuan dari formasi Pemali Anggota atas yang dikenal dengan kompleks Annalatus (Annalatus Complex) yang berumur miosen bawah bagian atas sampai miosen tengah bagian bawah. Formasi ini terbagi ke dalam fasies utara dan fasies selatan. Fasies utara terdiri dari batupasir kuarsa, napal, batu lempung, serpih, tuff, dan batu gamping kelapanunggal. Sedangkan fasies selatan terdiri dari batupasir kuarsa, lapisan tipis batu bara, batu gamping napalan, dan sisipan hasil erupsi gunung api. Batuan-batuan tersebut sebagian besar diperkirakan berasal dari Dataran Sunda, yang interkalasi dengan batuan vulkanik dari selatan. Dalam fasies tersebut banyak ditemukan fosil foraminifera besar *Cycloclypeus/Katacycloclypeus Annulatus* Martin, *Cycloclypeus* sp., *Lepidocyclina* sp., dan *Miogyssina* sp.

Di atas formasi pemali secara selaras diendapkan formasi Cidadap atau disebut juga formasi Halang bagian atas yang terdiri dari batu lempung, serpih dengan fasies laut, yang tersebar di bagian utara, breksi vulkanik, dan batu pasir tufaan yang tersebar di bagian selatan. Ketebalan lapisan ini diperkirakan 1200-1500 meter di wilayah bogor bagian tengah dan sekitar 1500-2500 meter di zona bogor bagian timur. Mengandung fosil *Lepidocyclina* sp., yang berumur miosen tengah bagian atas.

Di atas formasi Cidadap diendapkan secara tidak selaras batuan yang merupakan hasil kegiatan vulkanik yang disertai dengan intrusi-intrusi homblenda, andesit, dasit, diorit, dan kuarsa yang dikenal dengan nama Breksi Kumbang yang berumur miosen atas. Secara selaras di atas Breksi Kumbang diendapkan Formasi Kaliwangu yang terdiri dari serpih, batu lempung, napal, batu pasir tuffan, andestik, dasitik, konglomerat, dan breksi, serta lapisan tipis batu bara muda, berumur pliosen bawah. Fosil yang ditemukan adalah *Mollusca chirebonian* dan fauna vertebrata Cijulang bagian atas.

Secara selaras di atas formasi Kaliwangu diendapkan formasi Ciherang yang berumur pliosen atas. Di atas formasi Ciherang diendapkan secara tidak selaras Formasi Tambakan yang merupakan hasil gunung api yang berumur pleistosen bawah. Hasil termuda dari stratigrafi ini adalah endapan alluvium yang diendapkan di atas formasi-formasi lainnya.

Djuri (1996) dalam peta geologi lembar arjawinangun menyebutkan dari batuan tertua sampai yang termuda sebagai berikut: formasi Cinambo, batu gamping kompleks, kromong, formasi Halang, formasi Subang, formasi Kaliwangu, formasi Citalang, Breksi Terlipat, hasil gunung api tua, hasil gunung api muda, dan alluvium.

Formasi tertua adalah formasi Cinambo yang berdasarkan kandungan fosil foraminifera adalah berumur miosen bawah sampai miosen tengah. Formasi ini dibagi dua, yaitu anggota batu pasir (bagian bawah), dan Anggota serpih (bagian atas). Anggota batu pasir terdiri dari graywake yang mempunyai ciri perlapisan tebal dengan sisipan serpih, batu lempung tipis, batu pasir gampingan, tuf, batu lempung, dan batu lanau. Anggota serpih terdiri dari batu lempung dengan sisipan batu pasir, batu gamping, batu pasir gampingan, dan batu pasir tuffaan. Di atas formasi Cinambo diendapkan secara selaras batu gamping kompleks kromong yang terdiri dari batu gamping, batu lempung, batu pasir tuffaan. Formasi ini berumur meiosen tengah.

Secara selaras di atas batu gamping kompleks kromong diendapkan formasi Haling, yang terdiri dari anggota Halang bawah dan anggota Halang atas. Anggota Halang bawah terdiri dari batu gunung api yang bersifat andestik sampai basaltik, batu lempung, tuf, dan konglomerat. Anggota Halang atas terdiri dari batu pasir tuffaan, batu lempung dan konglomerat. Formasi ini berumur miosen tengah sampai miosen atas.

Diatas formasi Halang secara selaras diendapkan formasi Subang yang terdiri dari batu lempung yang mempunyai sisipan batu gamping yang berwarna abu-abu tua dan kadang-kadang dijumpai sisipan batu pasir glaukonit yang berwarna hijau. Formasi ini berumur miosen atas. Kemudian secara tidak selaras di atas formasi Subang diendapkan formasi Kaliwangu yang terdiri dari batu lempung yang mengandung moluska, koglomerat, dengan lensa-lensa batu pasir dan sisipan batu pasir tuffan dan kadang-kadang ditemukan lapisan batu pasir gampingan, dan batu gamping. Formasi ini berumur pliosen bawah.

Di atas formasi Kaliwangu secara selaras diendapkan formasi Citalang yang terdiri dari batu gamping koral, batu pasir, batu pasir tuffaan, batu lempung tuffaan, konglmerat, dan kadang-kadang dijumpai lensa-lensa batu pasir gampingan yang padu. Formasi ini berumur pliosen tengah sampai pleison atas.

Di atas formasi Citalang secara tidak selaras terdapat breksi terlipat yang terdiri dari breksi gunung api yang bersifat andesitic, breksi tufaan, batu pasir kasar, batu lempung tufaan, dan greywacke. Batuan ini berumur pleistosen bawah. Kemudian endapan hasil gunung api terdiri dari breksi lahar, lava andesitic sampai basaltic. Endapan ini berumur pleistosen tengah sampai pleistosen atas. Kemudian secara selaras di atas endapan gunung api tua diendapkan endapan gunung api muda yang terdiri dari breksi lahar, batu pasir tufaan, lapili, lava andesitik sampai basaltik. Endapan ini diperkirakan hasil dari produk Gunung api Ciremai, dan Gunung api Tampomas. Batuan ini berumur pleistosen atas sampai holosen Bawah.

5.1.3 Sejarah Dan Struktur Geologi Regional Bogor

Van Bemmelen (1970) mengemukakan bahwa pada awal Oligosen zona bogor merupakan cekungan laut dalam yang ditandai dengan adanya endapan flysh, endapan laut dengan sisipan batuan vulkanik yang kemudian dikenal dengan nama formasi pemali. Setelah evolusi non vulkanisme berakhir, dilanjutkan dengan suatu aktivitas vulkanisme yang disertai dengan gejala penurunan, sehingga terbentuk gunung api bawah laut pada awal miosen yang menghasilkan endapan yang bersifat andesitic dan basaltik. Pada miosen tengah aktivitas vulkanisme berkurang dan diganti dengan pengendapan lempung, napal, dan gamping terumbu yang menandakan lingkungan laut dalam. Di zona Bogor pada masa itu dibentuk endapan formasi Cidadap dan formasi Halang. Fasies selatan tersusun atas breksi dan batu pasir tufaan, sedangkan fasies utara tersusun atas batu lempung dan napal.

Akhir miosen tengah terbentuk geantiklin di pegunungan selatan yang disusul dengan peluncuran puncaknya kearah cekungan Jawa Bagian utara. Akhir miosen atas aktivitas vulkanisme bergeser ke zona Bandung dan Bogor selatan yang menghasilkan endapan breksi kumbang. Hal ini menunjukkan bahwa zona tunjaman arahnya telah bergeser lebih ke selatan dari sebelumnya. Selama kegiatan vulkanisme miosen tengah, sedimen zona Bandung dan zona Bogor mengalami erosi kuat. Sementara itu dataran pantai Jakarta mengalami penurunan dengan ditandai oleh diendapkannya lempung dan napal yang dikenal dengan nama formasi Kaliwangu, yang berumur pliosen. Pada miosen atas dapat dikatakan bahwa cekungan Bogor telah berubah menjadi dangkal. Hal ini ditandai dengan adanya satuan batu pasir dengan struktur sedimen silang siur dan fosil mollusca. Di atasnya diendapkan endapan vulkanik pliosen-plistosen dimana aktivitas ini terlihat jelas pada jalur transisi Zona Bandung dan Zona Bogor. Pada pliosen tengah aktivitas vulkanisme kembali terjadi dan mengakibatkan formasi Kaliwangu yang berfasies sedimen berubah kearah fasies vulkanik yang bersifat andesitic kemudian di atasnya

diendapkan konglomerat formasi Ciherang. Menurut Van Bemmelen (1970) zona Bogor telah mengalami dua kali masa periode tektonik :

1. Periode intra Miosen atau Miosen Pliosen.
2. Periode Pliosen- Plistosen.

Pada periode tektonik intra tektonik miosen, berlangsung pembentukan geantiklin jawa, akibat gaya tekanan dari arah selatan terbentuk struktur lipatan dan sesar pada sedimen di utara. Peristiwa ini terjadi setelah formasi cidadap diendapkan pada miosen tengah. Pada miosen atas atau miosen-pliosen antiklinorium ini mengalami intrusi dasit dan andesit hornblende, di samping itu terjadi pula ekstrusi breksi kumbang di ujung timur zona Bogor. Ketidakselarasan antara formasi Subang dan formasi Kaliwangu yang berumur pliosen bawah (silitonga,1973) yang terjadi pada zona bogor bagian utara menandakan bahwa periode miosen – pliosen tersebut terjadi proses perlipatan pada keseluruhan zona Bogor bagian utara.

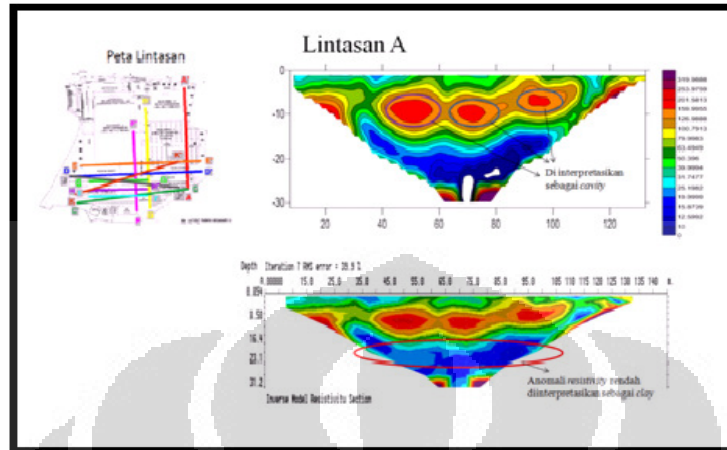
Pada periode tektonik pliosen-pleistosen terjadi proses perlipatan dan sesar yang diakibatkan oleh terjadinya amblesan di bagian utara Zona Bogor yang kemudian menimbulkan gangguan terdahulu tekanan yang kuat pada zona Bogor. Pada kala pliosen-pleistosen bagian barat zona Bogor mengalami pengangkatan dan membentuk kaliglagah *beds* yang terdiri dari endapan klastik dan lignit dan selanjutnya.

5.2 Data Geofisika

5.2.1 Interpretasi Model Inversi Data *Resistivity* Dua Dimensi Masing-Masing Lintasan

Berdasarkan yang telah dijelaskan pada Bab 1, metode *resistivity* sangat efektif dalam memetakan daerah yang terdapat *cavity* di bawah permukaan. Penggunaan metode ini juga diharapkan mampu mengestimasi *cavity* pada daerah penelitian yang didominasi batuan sedimen. Terdapatnya *cavity* di bawah permukaan dapat menyebabkan anomali *resistivity* yaitu bisa anomali *resistivity* tinggi atau anomali *resistivity* rendah bergantung pada material yang mengisi *cavity* tersebut. Untuk memudahkan menentukan nilai *resistivity cavity* maka penulis menyamakan *contour scale* pada penampang *resistivity* dua dimensi tersebut. Hal ini untuk lebih mudah menentukan nilai *resistivity cavity* pada daerah pengukuran. Model inversi data *resistivity* ditampilkan dalam dua *section* yaitu hasil dari *res2dinv* dan *surfer 9* dan disertai peta lintasan semua pengukuran.

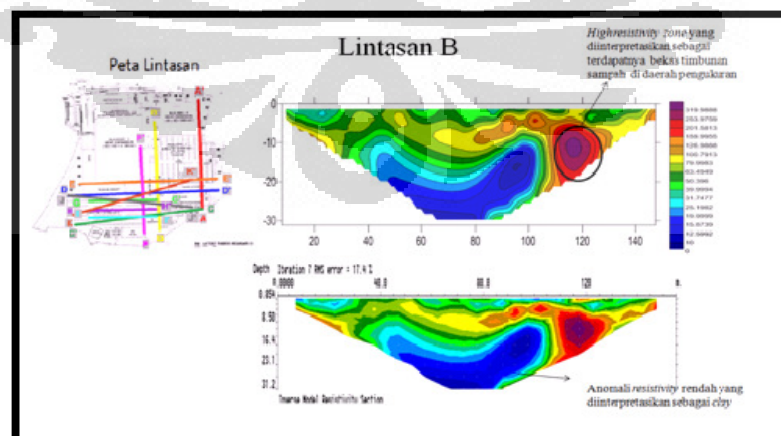
5.2.1.1 Interpretasi Model 2D Lintasan A



Gambar 5.2 Interpretasi Model 2D lintasan A

Gambar 5.2 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan A. lintasan ini memotong lintasan D dan lintasan E. Pada gambar tersebut, terdapat anomali *resistivity* rendah pada kedalaman sekitar 13 meter – 26 meter yaitu sepanjang lintasan 30-100 pada lintasan A. Anomali ini berdasarkan tabel 2.1 dan daerah geologi penelitian dapat diinterpretasikan sebagai *clay*. Sedangkan, *cavity* pada lintasan ini diinterpretasikan memiliki *high resistivity* yang memiliki nilai sekitar 127-160 Ohm.meter. *Cavity* ini terdapat sekitar sepanjang lintasan 43-60, 65-75, dan 90-105 pada awal lintasan A. Kedalaman *cavity* pada daerah pengukuran ini berkisar antara 7-12 meter di bawah permukaan.

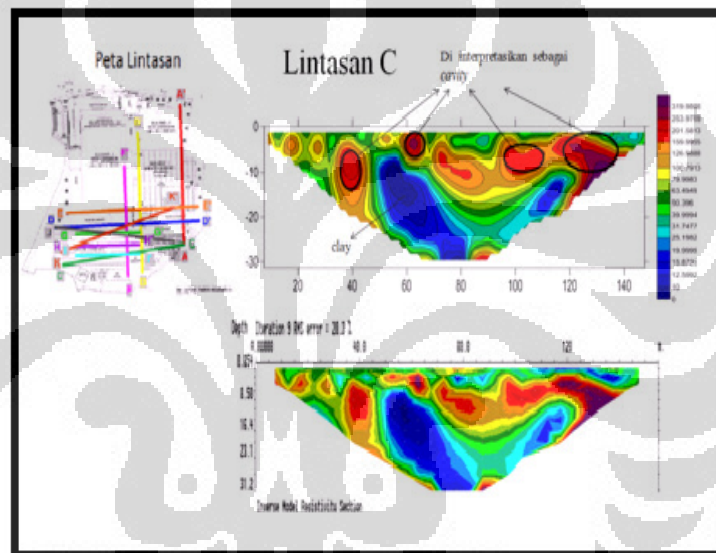
5.2.1.2 Interpretasi Model 2D Lintasan B



Gambar 5.3 Interpretasi Model 2D lintasan B

Gambar 5.3 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan B. Lintasan ini memotong lintasan D dan Lintasan E. Terdapatnya anomali *resistivity* rendah pada lintasan ini diinterpretasikan adanya *clay* di bawah permukaan. *Clay* pada daerah pengukuran ini terdapat pada kedalaman sekitar 13-32 meter. Sedangkan, *high resistivity zone* pada lintasan ini diinterpretasikan sebagai adanya bekas timbunan sampah yang sangat resistif dimana bekas timbunan ini juga merupakan *cavity*. Kedalaman bekas timbunan sampah ini sekitar 9-21 meter di bawah permukaan. Pada lintasan ini *high resistivity zone* tidak merepresentasikan adanya *cavity* sehingga diduga pada lintasan ini tidak terdapatnya *cavity* di bawah permukaan.

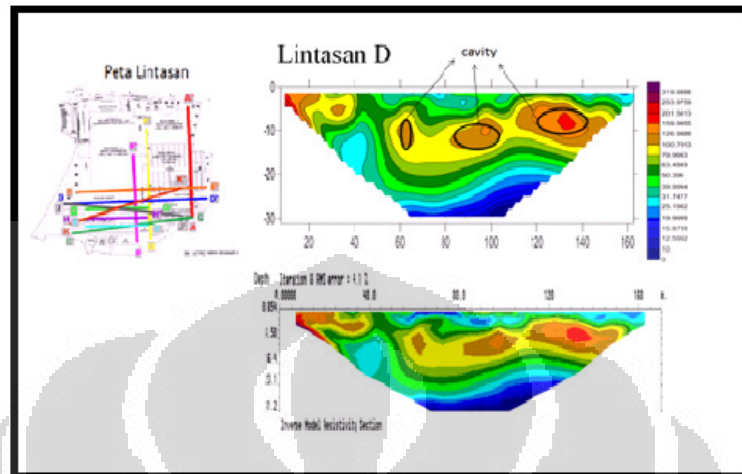
5.2.1.3 Interpretasi Model 2D Lintasan C



Gambar 5.4 Interpretasi Model 2D lintasan C

Gambar 5.4 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan C. Lintasan ini memotong lintasan G dan Lintasan K. Terdapatnya anomali *resistivity* rendah pada lintasan ini diinterpretasikan adanya *clay* di bawah permukaan. Sedangkan, *high resistivity zone* pada lintasan ini diinterpretasikan sebagai adanya *cavity*. Pada lintasan ini juga terlihat terdapat banyak *cavity*. Nilai *resistivity cavity* pada lintasan pengukuran ini sekitar 160 ohm.meter. Pada lintasan ini terlihat bahwa terdapatnya *cavity* yang tidak jauh dari permukaan dengan kedalaman sekitar 0.5 meter pada yang memiliki jarak sekitar 60-65 meter dari lintasan ini.

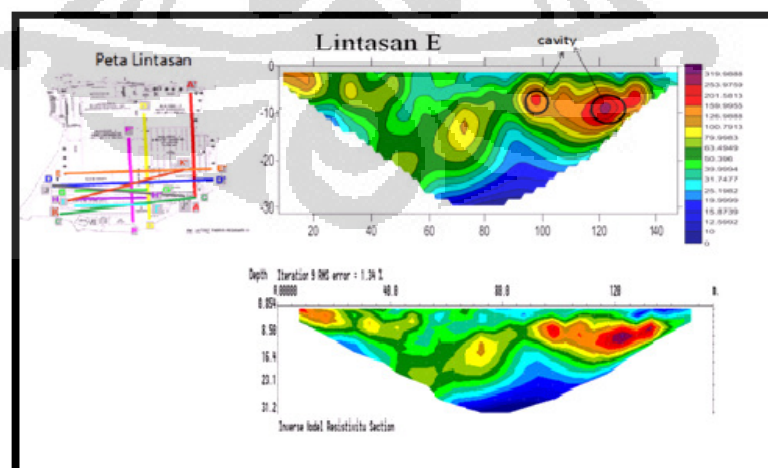
5.2.1.4 Interpretasi Model 2D Lintasan D



Gambar 5.5 Interpretasi Model 2D lintasan D

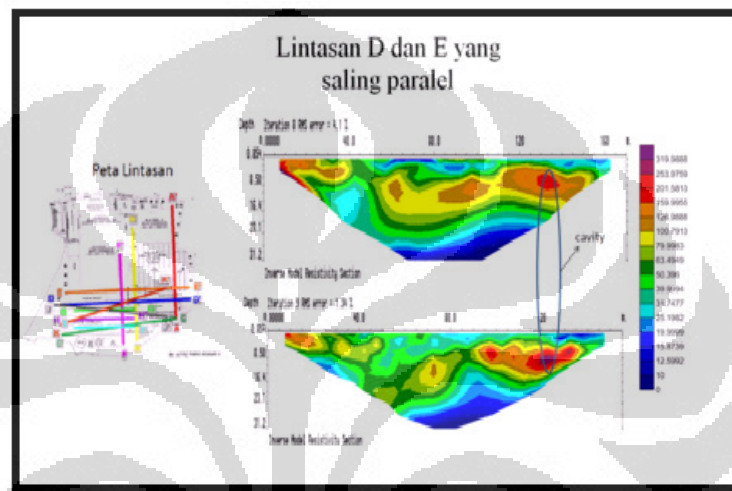
Gambar 5.5 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan D. Lintasan ini memotong lintasan B dan Lintasan F. Terdapatnya anomali *resistivity* rendah pada lintasan ini diinterpretasikan adanya *clay* di bawah permukaan yang memiliki kedalaman sekitar 25 - 30 meter. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 127 ohm.meter – 160 Ohm.meter. *Cavity* pada lintasan ini terdapat pada jarak 60 – 63 meter dengan kedalaman sekitar 8,5 – 13 meter. Selanjutnya pada jarak sekitar 85 – 105 meter dan 125 – 135 meter pada lintasan ini juga terdapat *cavity* dengan kedalaman sekitar 8,5 – 13,5 meter.

5.2.1.5 Interpretasi Model 2D Lintasan E



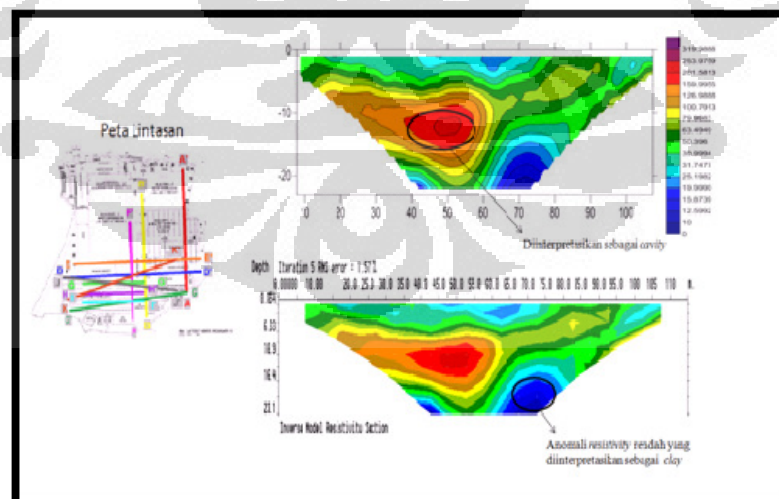
Gambar 5.6 Interpretasi Model 2D lintasan E

Gambar 5.6 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan E. Lintasan ini memotong lintasan B dan Lintasan F. Terdapatnya anomali *resistivity* rendah pada lintasan ini diinterpretasikan adanya *clay* di bawah permukaan yang memiliki kedalaman sekitar 25 - 30 meter yang hampir sama dengan lintasan D. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 160 Ohm.meter. *Cavity* pada lintasan ini terdapat pada jarak 95 – 100 meter dan 115 – 135 meter dengan kedalaman sekitar 8,5 – 14 meter.



Gambar 5.7 Interpretasi Model 2D lintasan D dan E saling paralel

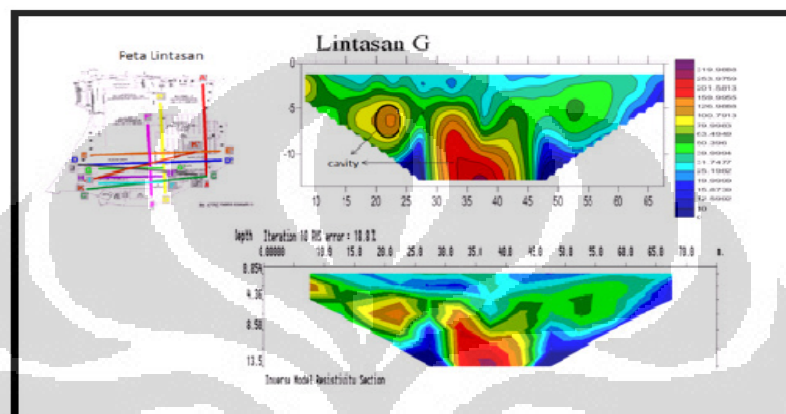
5.2.1.6 Interpretasi Model 2D Lintasan F



Gambar 5.8 Interpretasi Model 2D lintasan F

Gambar 5.8 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan F. anomali *resistivity* rendah pada lintasan ini diinterpretasikan adanya *clay* di bawah permukaan yang memiliki kedalaman sekitar 20 - 23 meter. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar 160 Ohm.meter dengan kedalaman *cavity* sekitar 10 – 15 meter. *cavity* ini terdapat pada jarak sekitar 35 – 55 meter dari titik awal lintasan F.

5.2.1.7 Interpretasi Model 2D Lintasan G

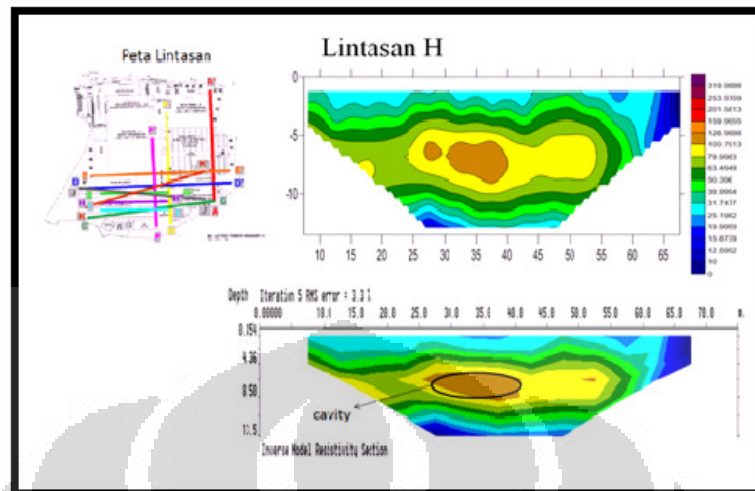


Gambar 5.9 Interpretasi Model 2D lintasan G

Gambar 5.9 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan G. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 127 – 160 ohm.meter dengan kedalaman *cavity* sekitar 10 – 15 meter. *cavity* ini terdapat pada jarak sekitar 30 – 40 meter dan 20 – 23 meter dari titik awal lintasan. Lintasan G ini sejajar dengan lintasan H dan I dan memiliki panjang lintasan yang sama dengan lintasan-lintasan tersebut yaitu 75 meter.

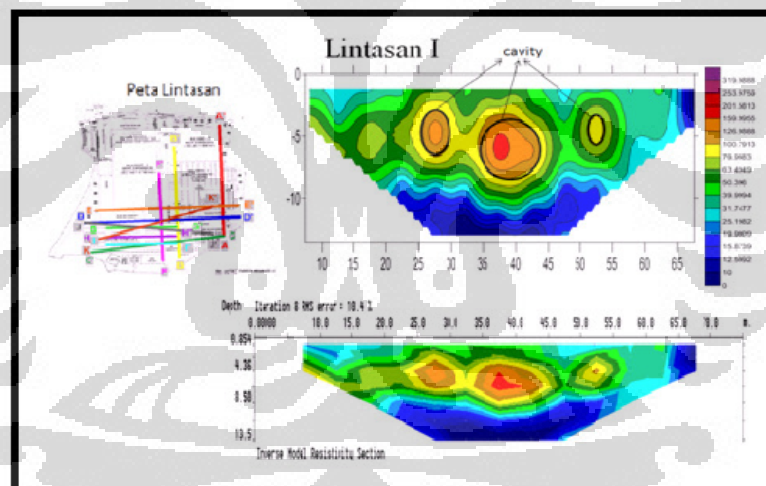
5.2.1.8 Interpretasi Model 2D Lintasan H

Gambar 5.10 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan H. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 127 ohm.meter dengan kedalaman *cavity* sekitar 7 – 11 meter. *cavity* ini terdapat pada jarak sekitar 27 – 40 meter dari titik awal lintasan ini. Pada model ini, dapat dilihat bahwa nilai *resistivity* 25 ohm.meter mendominasi nilai *resistivity* yaitu dari permukaan sampai kedalaman 2 meter. *Clay* pada lintasan ini terdapat pada titik akhir lintasan yaitu sekitar jarak 62 – 67 meter dengan kedalaman sekitar hampir 7 meter.



Gambar 5.10 Interpretasi Model 2D lintasan H

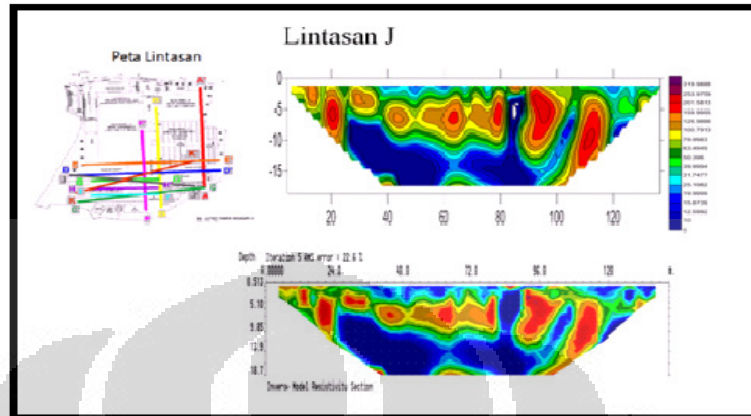
5.2.1.9 Interpretasi Model 2D Lintasan I



Gambar 5.11 Interpretasi Model 2D lintasan I

Gambar 5.11 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan I. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 127 ohm.meter, 160 ohm. Meter dan 80 ohm.meter. Nilai *resistivity* 127 ohm.meter terletak pada jarak sekitar 26 – 29 meter dari awal lintasan. Sedangkan *cavity* yang bernilai 160 ohm.meter dan 80 ohm.meter terletak pada jarak sekitar 37 – 38 m dan 52 – 54 meter dari awal lintasan. Kedalaman *cavity* pada lintasan ini berkisar antara 3 – meter. anomaly resistivity rendah yang diinterpretasikan *clay* mendominasi pada lapisan paling bawah yang memiliki kedalaman sekitar 9 – 15 meter.

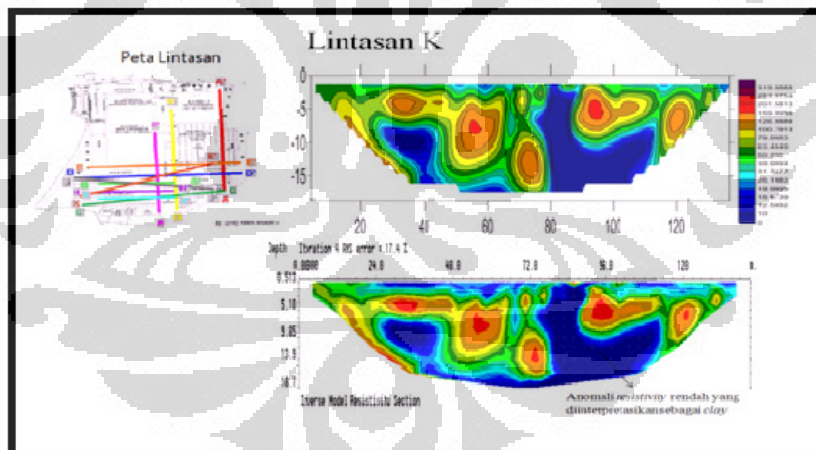
5.2.1.10 Interpretasi Model 2D Lintasan J



Gambar 5.12 Interpretasi Model 2D lintasan J

Gambar 5.12 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan J. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* 160ohm.meter. Pada lintasan ini terdapat banyak *cavity* dan kedalaman *cavity* pada lintasan ini berkisar antara 1,5 – 15 meter.

5.2.1.11 Interpretasi Model 2D Lintasan K



Gambar 5.13 Interpretasi Model 2D lintasan K

Gambar 5.13 merupakan model inversi penampang dua dimensi lintasan K. Pada lintasan ini, *cavity* memiliki nilai *resistivity* berkisar antara 127 – 160 ohm.meter. Lintasan ini terdapat banyak *cavity* yaitu pada lintasan 30 – 33 meter, 51- 60 meter, 72 – 75 meter dan 93-96 meter. anomaly resistivity rendah mendominasi pada lintasan 81-88 meter dari dekat permukaan sampai kedalaman sekitar 20 meter.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil interpretasi dan pembahasan, maka Penulis dapat membuat kesimpulan :

1. Metode *resistivity* dapat melokalisir keberadaan *cavity* di bawah permukaan berdasarkan terdapatnya anomali *resistivity* yang tinggi.
2. Nilai *resistivity cavity* secara kuantitatif memiliki nilai *resistivity* yang tinggi dengan nilai sekitar 127 ohm.meter – 160 ohm.meter.
3. Berdasarkan hasil pemodelan maka zona *cavity* terjadi pada daerah sedimen yang didominasi batuan pasir.
4. Karakteristik *cavity* di daerah “X” terdapat pada *resistivity* sangat tinggi yang mengindikasikan *cavity* yang terisi udara.

1.2 Saran

1. Untuk mencegah terjadinya hal-hal yang tidak diinginkan sebaiknya perlu dilakukan uji bor untuk mengetahui kestabilan tanah .
2. Untuk mencegah *subsidence* saat pembangunan, maka diperlukan metode geofisika lain untuk memetakan *bed rock* .

DAFTAR PUSTAKA

Klimis N.S, Papazachos C.B and Efremidis Ch F. 1999. Determination of the behavior of a sedimentary rock mass: comparison of measured static and dynamic properties proc. 9th Int. Conf. on Rock Mechanics (Paris, France).

Luna.R and Jadi.H. 2000. Determination of dynamic soil properties using geophysical methods Proc. 1st Int. Conf. On the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure Geophysics (Federal Highway Administration, Saint Louis, Mo) vol 3 pp 1-15.

Othman, A.A.A. 2005. Construed geotechnical characteristics of foundation beds by seismic measurements. Journal Geophysics England. **2** 126-38.

Soupios, P.M., Papazachos, C.B., Vargemezis, G and Fikos. I. 2005. Application of modern seismic methods for geotechnical site characterization Proc. Int. Workshop in Geoinvironment and geotechnics (Milos Island, Greece, 12-14 September) pp 163-70.

Soupios, P.M., Papazachos, C.B., Vargamezis, G and Savvaidis, A. 2006. In situ geophysical investigation to evaluate dynamic soil properties at th Ilarionas Dam, Northern Greece Proc. 2nd Int. Conf. Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (Hania, Crete, Greece, 25-27 September 2006) (Helitopos Conferences) pp 149-56.

Soupios, P.M., Georgakopoulos P, Papadopoulos N, Saltas V, Andreadakis A, Vallianatos F, Sarris A and Makris J.P. 2007. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation J. Geophys. Eng. **4** 94-103.

Venkateswara, V.R., Srinivasa R, Prakasa R.B.S and Koteswara, R.P. 2004. Bedrock Investigation by seismic refraction method – a case study J. Ind. Geophysics. Union **8** pp 223-8.

Vogelaar, B. B. S. A. , 2001. Cavity Detection : a feasibility study towards the application of seismic surface wave stack for identification and localization of underground voids, Geophysics graduation thesis, University of Utrecht.

Delgado J, Lopez C.C, Estevez A, Giner J, Guenca A and Molina S. 2000a. Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain) : a case study of microtremors as an exploration tool J.Appl. Geophys, **45**. 19-32.

Delgado J, Lopez C.C, Estevez A, Giner J, Guenca A and Molina S. 2000b. Microterms as a geophysical exploration tool : applications and limitations pure appl. geophys, **157**. 1445-62.

Delgado J, Alfaro P, Galindo-Zaldivar J, Jabaloy A, Lopez Garnido A.E and Sanz De Galdeano C. 2002. Structure of the Padol-Nigoelas Basin (S Spain) from H/V ratio of ambient noise : application of the method to study peat and coarse sediments pure Appl. Geophys . **159** 2733-49.

Ibs- Von Seht M and Wohlenberg. J. 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments Bull, seismol. Soc. Am, **89**. 250-9.

Parolai S, Borman P. and Milkreit C. 2001. Assesment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements J. Eartq. Eng. **5**. 541-64.

Parolai S, Borman P. and Milkreit C. 2002. New Relationships between V_s , thickness of sediments and resonance frequency calculated by H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany) Bull. Seismol. Soc. Am. **92** 2521-7.

Van Schoor, M. 2002. Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging: Journal of Applied geophysics, **50**, 393-399.

Panno, S.V., Wiebel, C.P., Heigold, P.C., and Reed, P.C. 1994. Formation of regolith collapse sinkholes in southern Illinois: Interpretation and Identification of associated buried cavities: Environmental Geology, **23**, p. 214-220.

Satarugsa, P., Manjai, D., Yangme, W. 2004. Evaluation of 2D resistivity imaging technique for mapping and monitoring of subsurface cavity collapsed into sinkhole: ASEG 17th Geophysical Conference and Exhibition.

Noel, M., and Xu, B. 1992. Cave detection electrical resistivity tomography: *Cave Science*, V. 19, P. 131-147.

Smith D. 1986. Application of the pole-dipole resistivity technique in the detection of solution cavities beneath highways: *Geophysics*, v. 51, p. 833-837.

Ushijiima, K., Mizunaga, H., and Nagahama, S. 1989. Detection of cavities by pole-dipole resistivity method: *Butsuri Tanasa (Geophysical Exploration of Japan)*, v. 40, p. 324-344.

Manzanilla, L., Barba, L., Chaves, R., Tejero, A., Cifuentes, G. and Peralta, N. 1994. *Cave and Geophysics: An approximation to the underworld of Teotihuacan, Mexico: Archaeometry*, v. 91, p. 131-147.

Elawadi, E., El-Qady, G., Salem, A., and Ushijima, K., 2001, Detection of cavities using pole-dipole resistivity technique: *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Univ.*, v. 61, p. 101–112.

Roth, M.J.S., Mackey, J.R., Mackey, C., Nyquist, J.E.1999. A case study of the reliability of multi-electrode earth resistivity testing for geotechnical investigations in karst terrains. in Beck, B.F., Pettit, A.J and Herring, J.G., *Proceedings of the 7th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Balkema, p. 247-252.

Labuda, Z.T. and Baxter, C.A. 2001. Mapping karst conditions using 2D and 3D resistivity imaging methods : in Powers, M., *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics and Engineering and Environmental Problems, Environmental and Engineering Geophysical Society*, CD-ROM, Paper GTV-1.

Habberjam, G. M. , 1969. The Location of Spherical Cavities Using a Tripotential Resistivity Technique : *Geophysics*, vol.34. no 5, P. 780-784.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, second edition, pp.522-524, Australian and New York : Cambridge University Press, USA.

Dey A. and Morrison H.F. 1979a. Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* 27, 1020-1036.

Dey A. and Morrison H.F. 1979b. Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional structures. *Geophysics* 44, 753-780.

Silvester P.P and Ferrari R.L., 1990. Finite elements for electrical engineers (2nd. Ed.). Cambridge University Press.

Lines L.R and Treitel S., 1984. Tutorial : A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.

Inman, J.R., 1975. Resistivity inversion with ridge inversion. *Geophysics*, **40**, 798-817.

Ellis, R.G. and Oldenburg, D.W., 1994a, *Applied Geophysical Inversion: Geophysical Journal International*, **116**, 5-11.

Constable, S.C., Parker, R.L and Constable, C.G., 1987. Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**, 289-300.

deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, **55**, 1613-1624.

Claerbout, J.F. and Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, **38**, 826-844.

Wolke, R. and Schwetlick, H., 1988, Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons: *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, **9**, 907-921.

Butler, Dwain K. 1994. "Detection and Delineation of Subsurface Cavities, Tunnels and Mines," "Geotechnical Lecture Series, Illinois Section, American Society of Civil Engineers, 3:1-29.

Loke, M.H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2d and 3d surveys.

Klimchouk, A. 2005. Subsidence hazards in different types of karst : evolutionary and speleogenetic approach. *Environmental Geology* 31, 42-49.

Brinkmann, R., Parise, M., Dye, D. 2008. Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment : Hillsborough country . Tampa Bay area, Florida, *Engineering Geology* 99, 169-184.

Frumkin, A., Karkanas, P., Bar-Matthews, M., Barker, R., Gopher, A., Shahack-Gross, R., Vaks, A. 2009a. Gravitational deformations and fillings of aging caves: the example of Qesem karst system, Israel. *Geomorphology* 106, 154-164.

Parise, M., De Waele, J., Gutiérrez, F. 2009. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. *Environmental Geology* 58, 235-237.

Ford, D.C., Williams, P.W. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester. 562 pp.

Abelson, M., Baer, G., Shtivelmann, V., Wachs, D., Raz, E., Crouvi, O., Kurzon, I., Yechieli, Y. 2003. Collapse sinkholes and radar interferometry reveal neotectonics concealed within the Dead sea basin. *Geophysical Research Letters* 30, 1545.

Gutiérrez, F., 2009. Hazards associated with karst . In : Alcántara, I., Goudie, A. (Eds), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 161-175.

Daud, Yunus. 2008. Lecture Note: Geoelectricity and Electromagnetism. University of Indonesia.

Supriyanto. 2007. Analisis Data Geofisika : Memahami Teori Inversi. Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia.

Lodeyik, Jimmi Daniel. 2008. Pemodelan 3D Zona Mineralisasi Endapan Emas Sistem Sedimen *Hosted* Daerah X. Skripsi S1 Universitas Indonesia, Depok.

Parulian, Hendro Bakti. 2009. *Pemodelan 3D Zona Mineralisasi Endapan Emas Sistem Epithermal Daerah "Z", Untuk Menentukan Titik Ore Shoot Pada Bor Eksplorasi*, Universitas Indonesia, Depok, Tidak diterbitkan.

