

PROSES PENGAMBILAN DATA DAN PEMANFAATAN GEOLISTRIK METODA 4-D UNTUK PEMETAAN GEOLOGI BAWAH PERMUKAAN

DATA COLLECTING PROCESS AND USE OF 4-D GEOELECTRIC METHOD FOR SUB SURFACE GEOLOGY MAPPING

Agus Kuswanto, Wahyu Garinas, Syabarudin Zikri

Perekayasa, Peneliti - Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Mineral (PTPSM)
Deputi TPSA – Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Gedung Geostech 820, Puspipstek Serpong, Banten, 15314.

Email : agus.kuswanto@bppt.go.id; wahyu.garinas@bppt.go.id;
syabarudin.zikri@bppt.go.id

Abstrak

Geolistrik sebagai metode dan alat untuk eksplorasi telah dimulai sejak tahun 1900-an. Perkembangan teknologi komputer pada saat ini membuat penerapan metode geolistrik saat ini menjadi lebih populer. Aplikasi metode geolistrik biasanya untuk eksplorasi air tanah tetapi sekarang banyak digunakan untuk eksplorasi mineral dan geologi teknik. Teknik inversi sekarang ini banyak menggunakan metode geolistrik dengan konfigurasi 3-D (tiga dimensi). Proses pemilihan metode geolistrik sangat penting sehingga kita dapat memilih dalam menggunakannya. Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan metode geolistrik 4-D untuk mengidentifikasi objek dinamika : rembesan limbah, kepadatan tanah dan air tanah. Aplikasi metode ini (4-D) diidentifikasi bisa digunakan untuk monitoring dan mendeteksi aliran suatu cairan ataupun potensial endapan.

Kata Kunci : geolistrik 3-D, geolistrik 4-D, kondisi bawah permukaan.

Abstract

Geoelectrics as a method and tool for exploration has been started since the 1900s. The development of computer technology at this time makes the application of geoelectric method is now becoming more popular. The application of geoelectric methods usually for groundwater exploration but now widely used for mineral exploration and engineering geology. Today's inversion technique uses many geo-electric methods with 3-D configurations. The process of selecting the geoelectric method is important so that we can choose to use it. This research was conducted to utilize 4-D geoelectric method to identify object dynamics: waste seepage, soil density and groundwater. The application of this method (4-D) was identified to be used for monitoring and detecting potential flow of a fluid or sediment.

Keywords : resistivity 3-D, resistivity 4-D, soil density, infiltration.

Diterima (received) : 06 Februari 2018, Direvisi (revised) : 27 Februari 2018,
Disetujui (accepted): 02 April 2018

PENDAHULUAN

Eksplorasi mineral telah dilakukan sejak ratusan tahun yang lalu tetapi catatan ilmiah mengenai hal ini baru dimulai pada tahun 1556 dimana Georgius Agricola

mempublikasikan *De re Metallica*. Dunia pertambangan menjadi berkembang dengan ilmu-ilmu yang sangat mendukung antara lain ilmu geologi dan geofisika.

Meningkatkan penggunaan logam dan mineral yang meningkat menyebabkan

berkembang pula ilmu dan teknologi untuk eksplorasi. Umumnya lokasi sumberdaya mineral terdapat di bawah permukaan bumi, maka teknologi dikembangkan supaya metoda yang dipakai dapat mendeteksi benda-benda bawah permukaan dengan lebih sensitif. Metoda-metoda geofisika yang diterapkan berdasarkan variasi sifat-sifat/*properties* dari batuan dikembangkan untuk mengidentifikasi struktur yang berasosiasi dengan gas dan minyak bumi seperti patahan, antiklin, sinklin, yang terletak di bawah permukaan bumi.¹⁾

Berdasarkan pengambilan data maka pada prinsipnya di dalam metoda geofisika ada 2 (dua) macam cara yaitu metoda geofisika dinamis dan metoda geofisika statis. Pada metoda geofisika dinamis dilakukan "gangguan" terhadap bumi kemudian respon yang diberikan akibat gangguan tersebut di catat di permukaan. Dari respon yang diberikan ini kemudian dibuat interpretasi kondisi bawah permukaan bumi. Gangguan ini dapat berupa getaran seismik maupun injeksi arus listrik. Contoh metoda ini adalah seismik, geolistrik, georadar dan sejenisnya. Sedangkan pada metoda yang kedua yakni metoda statis, fenomena fisika di bawah permukaan bumi dicatat tanpa melakukan gangguan ke bumi. Contoh metoda ini adalah metoda *gravity*, *magnetic*, *VLF* (Very Low Frequencies) dan sejenisnya.

Kegiatan dalam penelitian ini merupakan bagian dari metoda geolistrik dimana metoda dinamis dengan sumber gangguan berupa injeksi arus listrik ke dalam bumi.

Penggunaan metoda geolistrik sudah ada sejak awal abad ini kemudian mulai banyak dipakai untuk keperluan eksplorasi pada tahun 1970-an. Pertama kali awalnya di Indonesia metode yang banyak dipakai adalah metoda aturan Schlumberger dan Wenner. Pada metoda ini pengambilan data V (beda potensial) dan I (kuat arus) dilakukan mengikuti konfigurasi elektroda yang dibuat oleh aturan Schlumberger dan Wenner. Aplikasi yang umum dilakukan awalnya adalah untuk eksplorasi air bawah tanah.

Selain metoda tersebut, sebenarnya sudah dikenal juga metoda lain yaitu *pole-pole*, *dipole-dipole*, *pole-dipole*, *wenner-Schlumberger* dan lain sebagainya. Pada saat awalnya metoda ini tidak terlalu banyak dipakai karena pada waktu pengambilan datanya memerlukan waktu yang lama. Demikian pula untuk pengolahan datanya masih belum ada software pemodelan yang memadai sehingga hasil yang diperoleh masih berupa *pseudosection* (penampang

semu). Penampang ini merupakan penampang vertikal yang menggambarkan gambaran bawah permukaan berdasarkan distribusi tahanan jenis semu.²⁾

Sekitar tahun 1990-an mulai dikenal luas, software inverse data untuk geolistrik *dua dimensi* (2-D) yang dibuat oleh ilmuwan Malaysia yaitu M.H. Loke yang dikenal sebagai Res2D/Res3D. Dengan software tersebut di maka para pengguna metoda geolistrik dengan mudah mendapatkan *true section* (bukan *pseudosection*). True Section merupakan gambaran penampang bawah permukaan (sub-surface section) berdasarkan nilai tahanan jenis sebenarnya. Melalui *true section* ini, kalangan ahli geologi sangat dibantu dalam membuat interpretasi keberadaan sumberdaya mineral, batubara dan bahkan patahan-patahan bawah permukaan untuk kepentingan geologi teknik.

Masalah timbul pada waktu pengambilan data di lapangan karena geolistrik 2-D memerlukan jumlah data yang lebih banyak dibandingkan geolistrik satu dimensi (1-D) yang biasanya menggunakan aturan Schlumberger atau Wenner. Apabila menggunakan cara pengambilan data yang tradisional (menggunakan 4 besi elektroda), maka dalam satu section sepanjang 300 m misalnya, bisa memerlukan waktu 4 hari untuk pengambilan datanya. Disamping itu, karena dalam pengambilan data elektroda besi di geser bolak-balik mengikuti aturan yang dibuat, maka kalau hanya menggunakan 4 elektroda akurasi data yang dihasilkan juga tidak terlalu baik. Untuk mengatasi ini peneliti BPPT melakukan inovasi dengan alat Geoscanner. Dikembangkan nya geoscanner ini merupakan suatu peripheral untuk peralatan *resistivitymeter* sehingga hasil survey menggunakan metoda Resistivity 2D dapat lebih cepat dan akurat dibandingkan metoda tradisional yang sudah ada dan peripheral ini dapat dipakai untuk resistivitymeter dengan merk dan type apapun.

Geoscanner hasil inovasi BPPT telah digunakan untuk survey kebumihan untuk keperluan eksplorasi batubara dan mineral hampir diseluruh Indonesia seperti : Sumatera, Jawa, Kalimantan dan Sulawesi. Alat ini digunakan untuk kegiatan eksplorasi air bawah tanah terutama mencari air daerah Kars, potensi gambut, studi geologi teknik, lingkungan.

Pemodelan pada metoda geolistrik sejalan dengan perkembangan komputer. Dengan adanya perkembangan teknologi komputasi maka persoalan numerik yang semula harus diselesaikan dengan komputer

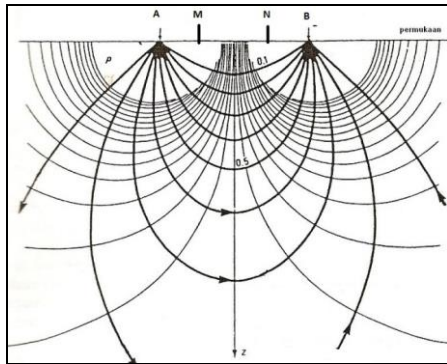
Pada gambar 1 di atas, beda potensial (δV) pada kulit bola tersebut pada lapisan setebal δr adalah:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho \cdot J = -\rho \frac{1}{2\pi r^2} \dots\dots\dots (1)$$

Apabila dialirkan arus dari pusat setengah bola tadi, maka voltase (V) pada titik r dari sumber arus adalah :

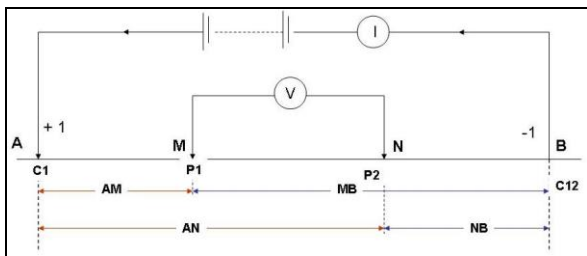
$$V_r = \int \delta V = -\int \rho \frac{1}{2\pi r^2} \delta r = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \dots\dots(2)$$

Jika terdapat dua sumber arus listrik dengan arah arus listrik dari A menuju B dan maka medan ekuipotensialnya seperti pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Garis arus listrik dan medan potensial karena adanya dua sumber arus

Untuk menghitung beda potensial di atas maka gambar 2 digambarkan seperti yang terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi elektroda pada metoda tahanan jenis.

Berdasarkan persamaan (2), maka potensial di titik M dan N adalah :

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right], \quad V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \dots\dots(3)$$

Beda potensial antara titik M dan N adalah :

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\} \dots\dots 4)$$

Besarnya tahanan jenisnya :

$$\rho = \frac{\delta V_{MN} 2\pi}{I} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \dots\dots (5)$$

$$\rho = \frac{V_{M-N}}{I} K \dots\dots\dots (6)$$

$$K = 2\pi \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \dots\dots (7)$$

Pada persamaan tersebut ;

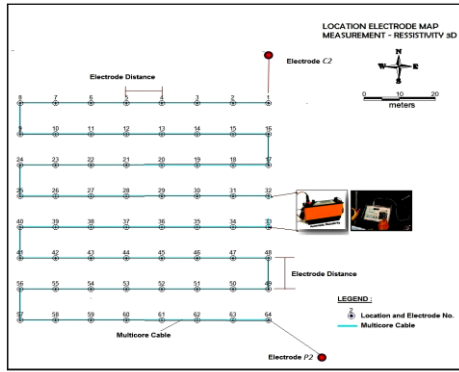
- V_M = Potensial di titik M
- V_N = Potensial di titik N
- V_{M-N} = beda potensial dari M ke N
- ρ = tahanan jenis (ohm.m)
- I = kuat arus (mA)
- K = faktor geometri

Persamaan (6) dan (7) merupakan persamaan umum yang dipakai untuk menghitung tahanan jenis pada pengukuran geolistrik 1D, 2D maupun 3D.

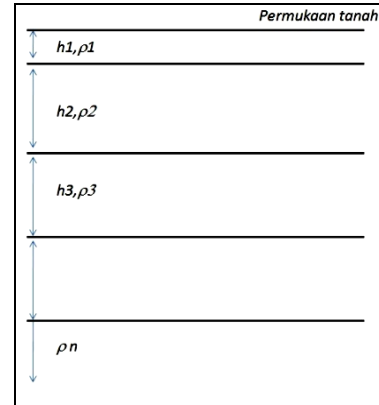
2. Pengambilan Data Geolistrik

Pada pengukuran geolistrik ini akan digunakan elektroda (patok besi) yang terbuat dari besi panjang sekitar 40 cm dengan diameter 1 cm. Elektroda ini ditancap ke dalam tanah kemudian disambungkan menggunakan kabel dengan alat ukur geolistrik. Elektroda yang disambungkan dengan pengirim arus listrik disebut elektroda arus (A dan B) sedangkan elektroda yang disambungkan dengan pembaca potensial disebut elektroda potensial (M dan N). Tata letak posisi elektroda arus dan potensial disebut konfigurasi elektroda. Geolistrik 1-D dan 2-D dengan elektroda ini di susun memanjang membentuk garis lurus. Hasil yang diperoleh berupa penampang tegak yang menggambarkan kondisi geologi di bawah permukaan.

Pengukuran dengan menggunakan metoda geolistrik 3-D ini memiliki konfigurasi elektroda tidak berbentuk garis memanjang namun membentuk suatu kotak dengan arah x dan y tertentu (gambar 4) .



Gambar 4. Letak elektroda pada konfigurasi 3D.

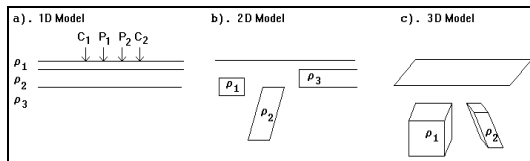


Gambar 6. Asumsi yang dipergunakan pada model geolistrik 1-D.

3. Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan adalah nilai tahanan jenis semu. Untuk mendapatkan nilai tahanan jenis sebenarnya, maka dilakukan pemodelan, yang umumnya dipakai pada saat ini adalah pemodelan kebelakang (pemodelan inversi).

Pemodelan pada geolistrik dikenal istilah pemodelan satu dimensi (1-D), dua dimensi (2-D) dan tiga dimensi (3-D). Bentuk blok-blok pemodelan dapat dilihat seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Bentuk blok-blok model 1-D, 2-D dan 3-D.

3.1 Pemodelan geolistrik 1-D

Model geolistrik 1-D, struktur bawah permukaan diasumsikan terdiri dari lapisan-lapisan horisontal, setiap lapisan mempunyai ketebalan dan tahanan jenis tertentu (gambar 4-5). Dengan pendekatan ini maka data tahanan jenis semu dapat dinyatakan sebagai fungsi dari parameter – parameter lapisan :

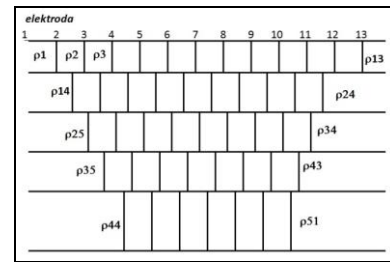
$$\rho_{aj} = f_j(h_1, h_2, \dots, h_{m-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m) \dots (8)$$

Pada persamaan ini, dimana : $j = 1, 2, \dots, n$ dengan n adalah jumlah data pengamatan.

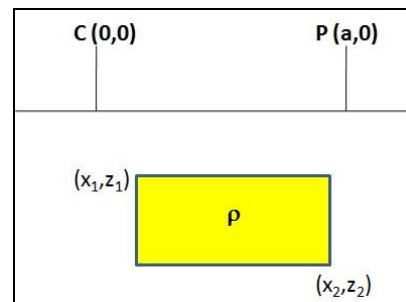
Persamaan 8 dapat digambarkan seperti pada gambar 6 berikut.

3.2 Pemodelan geolistrik 2-D

Model geolistrik 2-D, lapisan batuan di bawah permukaan bumi diasumsikan berbentuk blok-blok yang masing-masing mempunyai nilai tahanan jenis tertentu seperti yang dapat dilihat pada gambar 7, (Barker dan Loke ,1996).



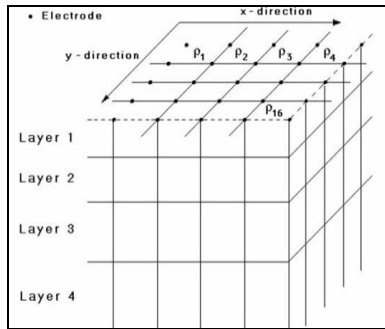
Gambar 7. Blok-blok lapisan di bawah permukaan hasil pemodelan (Barker dan Loke ,1996)



Gambar 8. Blok hasil pemodelan geolistrik 2-D.

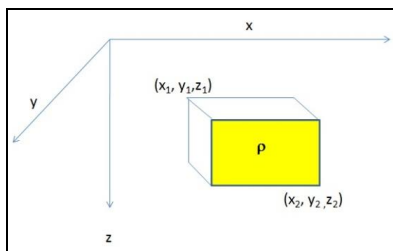
3.3 Pemodelan Geolistrik 3-D

Pada model geolistrik 3-D, model yang dibangun lebih realistis karena lapisan batuan di bawah permukaan bumi tidak diasumsikan berlapis-lapis namun terdiri dari blok-blok berbentuk tiga dimensi (gambar 9).



Gambar 9.

Model blok yang dipergunakan untuk perhitungan tahanan jenis semu



Gambar 10.

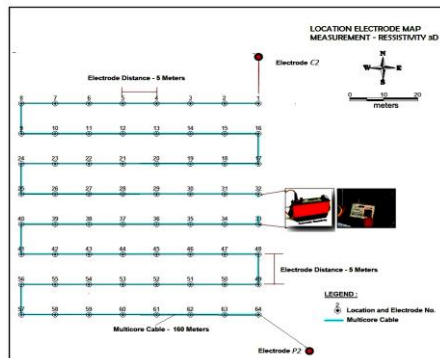
Blok model pada geolistrik 3-D.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendapatkan data dan membuat pemodelan dengan 3-D maka dilakukan pengukuran pada beberapa lokasi dalam ukuran simulasi dan lainnya di lapangan sesungguhnya.

1. Pengukuran Resapan Air.

Simulasi pengukuran direncanakan dengan menyiramkan air kedalam suatu area dengan ukuran grid yang direncanakan pada pengukuran ini adalah 8 grid x 8 grid dan antar elektroda berjarak 5 m, gambar 11.



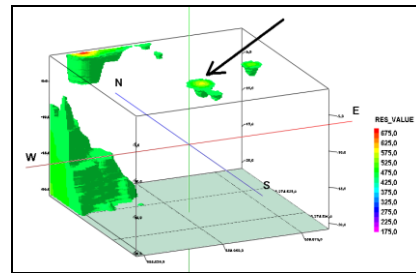
Gambar 11.

Konfigurasi Elektroda Untuk Pengukuran di lapangan.

Lapangan yang akan terpilih dilakukan penyiraman dilokasi titik tengah agar basah

dan setelah beberapa waktu baru dilakukan pengukuran geolistrik 3-D untuk mendeteksi kondisi air setelah proses penyiraman (tanda panah →). Pada penelitian ini digunakan semua model : wenner, dipole-dipole dan pole pole. Tetapi hanya metode pole-pole saja yang ditampilkan. Posisi elektroda dan resapan air pada gambar 11.

Hasil pengukuran di inversikan dengan menggunakan res3D dan hasil pemodelannya seperti gambar 12.



Gambar 12.

Pemodelan Inversi 3-D Dengan Metoda Pole-Pole.

Pada pengukuran ini menggunakan metode pole-pole dimana air yang disiramkan terdeteksi dan demikian pula kondisi bawah permukaan disekitarnya.

2. Metoda Geolistrik 3-D untuk Kepadatan Tanah.¹¹⁾

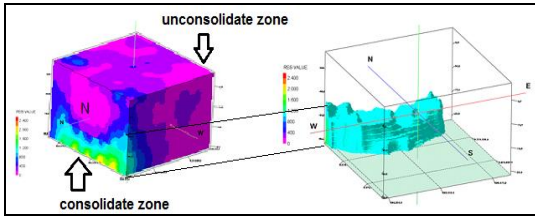
Simulasi Percobaan berikutnya adalah dengan melakukan geolistrik 3-D untuk pemetaan lokasi kepadatan tanah. Pengukuran di lapangan menggunakan konfigurasi 2-D dengan jarak antar lintasan 5 meter kemudian datanya diinversi menggunakan inversi 3-D seperti gambar 13.



Gambar 13.

Konfigurasi Elektroda Untuk Pengukuran Kepadatan Tanah.

Hasil inversi dapat dilihat pada gambar 14. Metoda yang dipakai adalah metoda dipole-dipole dengan spasi antar elektroda 2,5 meter.

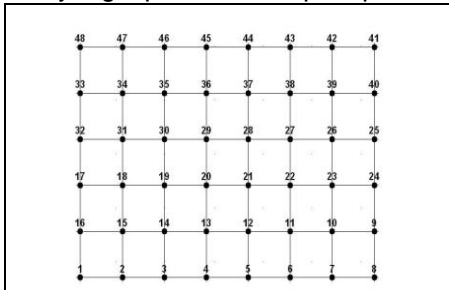


Gambar 14. Pemodelan 3-D Untuk Pengukuran Kepadatan Tanah.

Hasil pengukuran memperlihatkan bahwa tahanan jenis rendah dengan warna biru, merah jambu dan tahanan jenis tinggi adalah zona tanah padat berwarna hijau, kuning sampai merah tua.

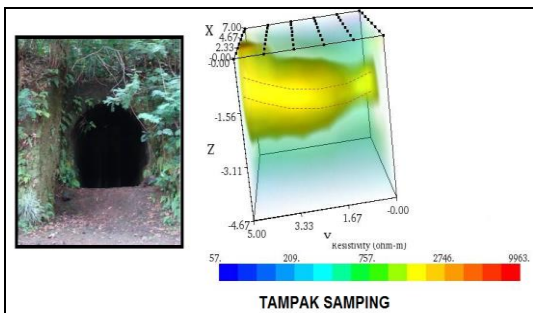
3. Metoda Geolistrik 3-D untuk Terowongan.

Percobaan selanjutnya adalah aplikasi metoda geolistrik 3-D untuk mengidentifikasi terowongan di bawah permukaan. Pada penelitian ini konfigurasi yang dipergunakan adalah konfigurasi geolistrik 3-D, gambar 15. Elektroda di susun pada arah sumbu x jumlahnya 8 sedangkan ke arah sumbu y jumlahnya 6. Jarak antar elektroda 1 m, dan metoda yang dipakai adalah pole-pole.



Gambar 15. Konfigurasi Elektroda Pengukuran Mendeteksi Terowongan.

Pengukuran dilakukan di permukaan tanah yang terletak di atas gua pada jarak kurang lebih 1.5 m. Posisi pengukuran dan hasil pemodelan geolistrik 3-D dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 16. Pemodelan Inversi 3-D untuk Terowongan dengan Metoda Pole-Pole.¹²⁾

Pengukuran di terowongan seperti goa mempunyai anomali yang tinggi dan cukup mudah dibedakan dari batuan disekitarnya. Hasil dari pemodelan ini ternyata goa tidak lurus horisontal melainkan ada penurunan dari mulut gua menuju ke dalam.

4. Geolistrik 4-D untuk Peresapan Air Tanah

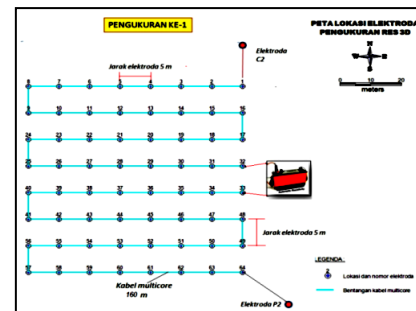
Penelitian berikutnya adalah aplikasi geolistrik 4-D untuk meneliti perembesan air permukaan. Konfigurasi yang dipakai pada metoda ini adalah metoda pole-pole 3D dengan jumlah elektroda 64. Dilakukan 2 kali pengukuran yaitu pengukuran sejajar pada sumbu yang tetap X,Y. Jarak antar elektroda pada arah X adalah 5 m, sedangkan jarak antar elektroda pada arah sumbu Y adalah 5 meter.



Gambar 17. Konfigurasi Elektroda Pengukuran Mendeteksi Aliran Air Tanah.

Selanjutnya dilakukan pengukuran Pengukuran geolistrik 4-D di tanah lapang. Konfigurasi yang dipakai pada metoda ini adalah metoda pole-pole 3D dengan jumlah elektroda 64. Pengukuran dilakukan berulang (time lapsed) sebanyak 2 kali yaitu pengukuran sejajar pada sumbu yang tetap X,Y. Kandungan air yang ada dan meresapnya air hujan ke dalam tanah dapat diamati.

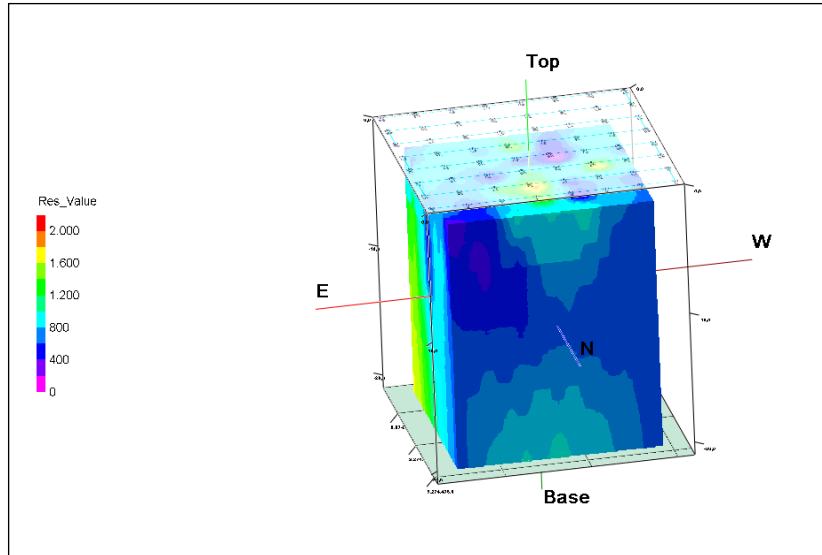
- Pengukuran 1.



Gambar 18. Tata Letak Elektroda untuk Uji Aplikasi 4-D Resistivity Pengukuran 1.

Pengukuran 4-D resistivity dilakukan di tanah lapang (gambar 18). Pengukuran geolistrik ini dilakukan dengan ukuran grid 8 x 8 dan jarak antar elektroda pada arah X

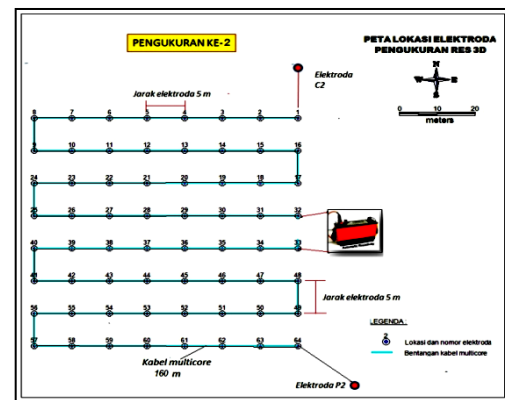
adalah 5 m sedangkan jarak antar elektroda pada arah sumbu Y adalah 5 meter.



Gambar 19. Pemodelan Inversi 4-D untuk Pengukuran 1 Air Tanah dengan Metoda Pole-Pole.

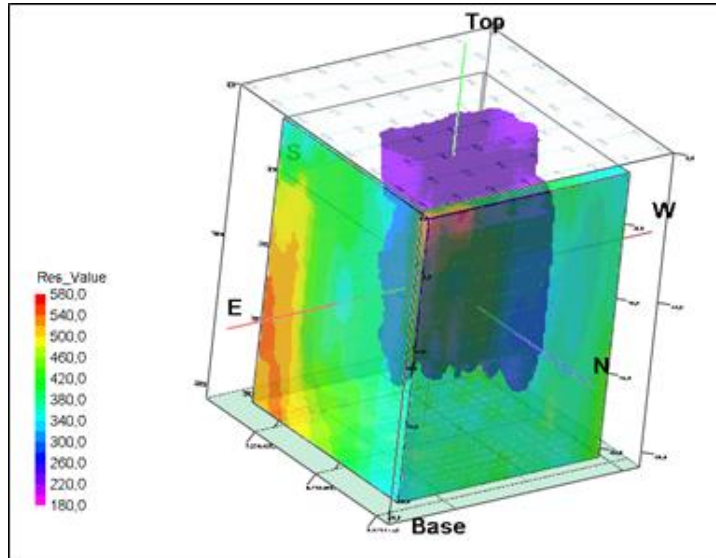
Hasil pengukuran yang dilakukan pada waktu pertama kali sesuai dengan kondisi lokasi lapangan pada awalnya. Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 19. Warna biru menunjukkan zone yang mempunyai konduktifitas tinggi. Diperkirakan zona ini adalah air permukaan (karena hujan).

• Pengukuran 2.
Data hasil pengukuran - 2 yang dilakukan hari berikutnya setelah pengukuran 1 seperti berikut :



Gambar 20. Tata Letak Elektroda untuk Uji Aplikasi 4-D Resistivity Pengukuran 2.

Hasil pengukuran yang kedua dilakukan pada waktu sore harinya dimana kondisi lokasi lapangan telah dibasahi dengan air asin pada titik tengahnya (tanda kotak □).



Gambar 21.

Pemodelan Inversi 4-D untuk Pengukuran 2 Air Tanah dengan Metoda Pole-Pole.

Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 21 dimana warna biru menunjukkan zone yang mempunyai konduktifitas tinggi. Diperkirakan zona ini adalah air permukaan rembesan. Selanjutnya zona conductivity ini diidentifikasi sebagai zona yang terisi air garam.

Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa warna lokasi resapan adalah biru tua. Warna ini menunjukkan suatu zona yang terisi air pada kondisi awal pengukuran. Setelah terjadi simulasi pembasahan air asin pada pengukuran ke-2 terjadi penampakan dan penambahan luas zona rembesan yang terisi air. Dari gambar ini dapat dilihat pergerakan air dari atas tengah lokasi lapangan yang kemudian kemudian turun.

SIMPULAN

Metoda geolistrik 3-D dengan konfigurasi yang telah dicoba yang menghasilkan data paling dalam adalah konfigurasi pole pole sedangkan metode Wenner biasanya dengan hasil yang kurang akurat baik ke arah lateral maupun horisontal. Untuk metode dipole dipole biasanya didapatkan konfigurasi yang paling baik akurasi terutama untuk penetrasinya.

Secara umum penggunaan geolistrik 3-D pada penelitian terowongan tidak terlalu rumit untuk mengidentifikasinya mengingat Gua mempunyai nilai tahanan jenis mendekati tak hingga sehingga dalam pengukuran menggunakan metoda geolistrik mudah dikenali dibandingkan batuan disampingnya. Demikian pula untuk

penelitian di lokasi kepadatan tanah metode geolistrik 3-D cukup akurasi untuk dipakai.

Dari penelitian di atas Metoda geolistrik 4-D dapat diaplikasikan di pada daerah yang dangkal misalnya mengamati perembesan air tanah atau limbah akibat pencemaran. Untuk lokasi penelitian yang kondisi lapangan yang memungkinkan untuk dijangkau maka penggunaan geolistrik 4-D dapat diaplikasikan pada lokasi yang lebih dalam misalnya mengidentifikasi kondisi bawah permukaan pada eksplorasi panas bumi. Pemanfaatan geolistrik 4-D untuk eksplorasi panas bumi merupakan bagian dari tujuan dari penelitian ini. Mengingat panas bumi masih sedikit dimanfaatkan padahal Indonesia memiliki potensi yang besar. Secara umum pemanfaatan lain geolistrik 4-D ini dapat digunakan untuk mengamati proses identifikasi yang sifatnya rembesan atau aliran pada waktu tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih diucapkan kepada kegiatan SINAS 2016 pengembangan PSBMC untuk akuisisi data resistivity dengan metode 4.D untuk mendukung riset pembangkit listrik berbasis panas bumi. Demikian pula untuk rekan-rekan satu tim penelitian dan PTPSM-TPSA yang terlibat dalam persiapan dan membantu mendapatkan data sehingga tulisan ini bisa diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Griffiths D.H. and Baeker R.D.1993, Two dimensional resistivity imaging and modeling in area of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*.
2. Jackson P.D., Earl S.J., Reece G.J., 2001. 3D Resistivity Inversion Using 2D Measurement of the Electric Field, *Geophysical Prospecting*, 2001, 49, p. 26-39.
3. Dey, A., Morrison H.F., 1979. Resistivity Modelling for Arbitrarily Shaped Two-Dimensional Structures, *Geophysical Prospecting* 27, 106 – 136.
4. Loke, M.H., Barker R.D., 1996. Practical Techniques for 3D Resistivity Surveys and Data Inversion, *Geophysical Prospecting*, 1996, 44, p. 449 - 523
5. Yi , M.-J., Kim J.-H., Song Y., Cho S.-J., 2001. Three-dimensional Imaging of Subsurface Structures Using Resistivity Data, 2001, 49, 483-497.
6. Pidlisecky A, Haber, E. and Knight, R.J.,2007. RESINVM3D : A 3D Resistivity Inversion Package, *Geophysics*, vol. 72 (March-April 2007),p.H1-H10.
7. Loke M.H., 2000. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys.
8. Minas, M., 2010. Monitoring Runoff from Highways Using 2-D and 3-D Resistivity Methods : case Study from Bjornnasvagen, Northern Stockholm, Degree Project for the Master Program in Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden.
9. Mansurudin, A, 2005. Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Untuk Menentukan Letak Akumulasi Rembesan Polutan Sampah Di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Pakusari, Jember. Jurusan Fisika Universitas Jember.
10. Reynolds J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Willey and Sons Ltd., England.
11. Tim Sinas 2016, Pengembangan PSBMC Untuk Akuisisi Data Resistivity Dengan Metode 4.D Untuk Mendukung Riset Pembangkit Listrik Berbasis Panas Bumi, Jakarta, Ristek, 2016, hal.39-40.
12. Kuswanto A, Pengembangan Metode Geolistrik 4-D untuk Perembesan Bawah Tanah (Development of 4-D Geoelectric Methode to Identify Subsurface Leakage), Prosiding PI-BPPT, 2015.