

TOMOGRAFI GEOLISTRIK UNTUK IDENTIFIKASI LITOLOGI PADA LOKASI RENCANA BENDUNG DAN TEROWONGAN DI SULAWESI UTARA

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY FOR IDENTIFICATION OF LITHOLOGY AT DAM AND TUNNEL SITE PLAN IN NORTH CELEBES

Boko Nurdianto^{1*}, Imam Suyanto², Bambang Sunardi³, Pupung Susilanto³

1. Upstream Technology Center, PT Pertamina, Jl Medan Merdeka Timur No 6, Jakarta, 10110

2. Program Studi Geofisika, FMIPA, UGM, Sekip Utara PO BOX BLS 21, Yogyakarta, 55281

3. Pusat Penelitian dan Pengembangan, BMKG, Jl Angkasa 1 No 2, Jakarta, 10720

*E-mail: boko.suwardi@pertamina.com

Naskah masuk: 20 Maret 2015; Naskah diperbaiki: 2 September 2016; Naskah diterima: 19 September 2016

ABSTRAK

Pengukuran geolistrik telah dilakukan untuk mengidentifikasi litologi dan akuifer berdasarkan resistivitas batuan pada lokasi rencana pembangunan bendung dan terowongan di daerah Sulawesi Utara. Survei tiga lintasan menggunakan konfigurasi dipole-dipole dengan 32 elektroda ($a = 5,5$ m) dan kabel ekstensi 9 elektroda ($a = 20$ m). Analisa tomografi resistivitas menunjukan daerah survei tersusun oleh tanah berupa lempung pasir (resistivitas rendah di permukaan), breksi Tondano ($30 - 1000 \Omega m$), lapukan tufa Tondano ($30 - 80 \Omega m$) dan tufa Tondano ($< 30 \Omega m$). Di area bendung pada bagian tepi sungai terdapat tanahtipis, breksi Tondano dan lapisan tufa Tondano. Lapisan Tondano daerah terowongan telah mengalami pelapukan menjadi lempung pasir dengan ketebalan hingga 15 m, sedangkan lapisan dibawahnya berupa breksi tondano yang telah lapuk menjadi pasir kelemungan dengan fragmen kerikil ($40 - 125 \Omega m$) hingga bongkah ($200 - 2000 \Omega m$) dengan ketebalan 10 - 35 meter. Pada kedalaman 50 m ditemukan intrusi andesit, kekar-kekar pada andesit diisi oleh air. Terdapat setidaknya ada lima akuifer dengan kedalaman sekitar 50 meter diantara lokasi rencana *surgetank* sampai *powerhouse*.

Kata kunci: Tomografi resistivitas, litologi, akuifer, bendungan, terowongan

ABSTRACT

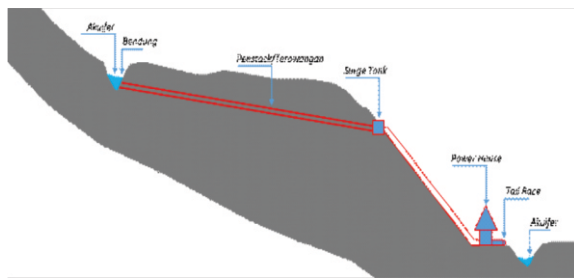
*Geoelectric measurements have been conducted to identify the lithology and aquifers based on rock resistivity at a dam and tunnel site plan in North Celebes using three-lines survey with 32 electrodes ($a = 5,5$ m) dipole-dipole configuration and 9 electrode extension cables ($a = 20$ m). Based on electrical resistivity tomography (ERT), it can be interpreted that the survey area is composed of soil in the form of sandy clay (low resistivity), breccia Tondano ($30 - 1000 \Omega m$), weathered of Tondano tuff ($30 - 80 \Omega m$) and tondano tuff ($< 30 \Omega m$). In the area of the dam, there are thin soil, a layer of tuff and breccia tondano on the river banks. Tondano layer in the tunnel area has experienced weathering into sandy clay with a thickness of up to 15 m, while layers below it has took the form of breccia, which has weathered into sandy loam with fragments of gravel ($40 - 125 \Omega m$) to boulder ($200 - 2000 \Omega m$) with a thickness of 10 - 35 meters. Andesite intrusion was found at a depth of 50 m, with cracks on andesite filled by water. There are at least five of the aquifers at a depth of about 50 meters between the location of *surgetank* to the *powerhouse* plan.*

Keywords: *electrical resistivity tomography, lithology, aquifer, dam, tunnel*

1. Pendahuluan

Keberhasilan dari desain struktur bangunan yang baik membutuhkan informasi jenis struktur lapisan tanah dan kondisi litologi batuan di lokasi rencana pembangunan struktur bangunan. Untuk tujuan pembuatan desain ini maka dilakukan identifikasi litologi menggunakan metode geofisika untuk melengkapi data bor dan penyelidikan geologi [1,2].

Geofisika mempunyai peranan penting dalam penyelidikan geoteknik, kaitannya dengan pekerjaan yang besar seperti pembangunan jembatan, bendungan, jalan dan gedung bertingkat [3-6]. Metode geolistrik mempunyai kemampuan untuk memetakan struktur geologi seperti lapisan tanah, akuifer, kontaminasi air, sesar dan rekahan [7-8].



Gambar 1. Penampang komponen utama bangunan pada PLTA

Dalam pembuatan PLTA di daerah Sulawesi Utara diperlukan pembangunan beberapa struktur bangunan sebagai tenaga penggerak pembangkit (Gambar 1). Komponen utama bangunan pada PLTA adalah bendung yang merupakan sebuah dinding yang dibentuk guna membendung air yang akan digunakan untuk memutar turbin. *Penstock* merupakan pipa yang berfungsi untuk mengalirkan air dari bendungan hingga sampai ke turbin. *Surge Tank* merupakan sebuah pipa yang memanjang vertikal pada pipa pesat (*penstock*). *Surge Tank* berfungsi menampung arus balik air yang terjadi akibat penutupan pintu air untuk mencegah kerusakan pada *penstock*. *Tailrace* merupakan saluran air yang berfungsi untuk mengalirkan air yang telah digunakan untuk memutar turbin. Rumah pembangkit atau *power house* adalah bangunan tempat memasang mesin pembangkit yaitu turbin, generator, panel kontrol, peralatan pendukung, serta ruang untuk operator. *Power house* didesain untuk melindungi mesin pembangkit dan peralatan lainnya dari perubahan cuaca.

Dalam pembangunan struktur bangunan *power house* harus diperhatikan kekuatan pondasi, terutama pondasi turbin yang akan menahan gaya potensial dan kinetik dari air yang mengalir melalui *penstock* dan turbin. Untuk memperhitungkan kekuatan dan desain struktur bangunan maka diperlukan *soil investigation* antara lain dengan penyelidikan tomografi geolistrik untuk mengetahui resistivitas (tahanan listrik) tanah, lapisan akuifer serta persebaran air tanah pada daerah rencana bangunan bendung dan terowongan [3].

Tujuan utama dari studi tomografi geolistrik resistivitas ini adalah untuk mengetahui litologi berupa perlapisan tanah berdasarkan kontras resistivitas batuan dan keberadaan lapisan yang mengandung air pada lokasi rencanapembangunan bendung dan terowongan di daerah Minahasa Utara, Sulawesi Utara.

Kondisi Geologi. Lokasi penelitian termasuk dalam daerah Sulawesi Utara, secara umum kondisi morfologinya terbagi dalam dua unit morfologi yaitu morfologi perbukitan dan morfologi dataran. Pembentukan lembah-lembah akibat tingkat

pelapukan yang lebih resisten dibandingkan daerah sekelilingnya dan dikontrol oleh adanya pengaruh struktur geologi. Daerah lembah ini kemudian teraliri air, sehingga terjadi proses erosi yang mengikis permukaan tanah baik secara vertikal maupun horizontal. Daerah lembah ini sebagian besar berupa daerah aliran sungai dengan sungai utamanya yaitu sungai Tondano dan sungai Saduan. Pada daerah sepanjang aliran sungai ditemui litologi yang berbeda yaitu batuan beku andesit, breksi Tondano, dan tufa Tondano. Stratigrafi di daerah penyelidikan termasuk dalam satuan Tufa Tondano (*Q_{tv}*). Satuan ini berupa klastika kasar gunungapi yang terutama berkomposisi andesit, tersusun dari komponen menyudut hingga menyudut tanggung, tercirikan oleh banyak pecahan batupung lapili, breksi, ignimbrite sangat padat, berstruktur aliran. Satuan ini terdapat di sekitar Danau Tondano di bagian Utara daerah Minahasa, membentuk punggung yang menggelombang rendah.

Struktur geologi pada daerah penyelidikan berupa kekar / rekahan-rekahan pada singkapan batuan beku andesit. Pada beberapa singkapan, bidang kekar / rekahan telah tersi oleh lempung. Longsor berupa longsor tanah dan batuan berukuran bongkah (>256 mm) di daerah penelitian, umumnya terjadi pada daerah satuan breksi Tondano pada tebing-tebing sungai yang relatif terjal dengan kondisi sudah mulai lapuk hingga terdekomposisi, selain itu longsor juga terjadi pada tufa pasir, hal ini dikarenakan tufa pasir memiliki sifat yang mudah rapuh dan lepas (*loose*).

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah tomografi resistivitas listrik atau *electrical resistivity tomography* (ERT) menggunakan sistem multi elektroda dan multi kabel untuk mendapatkan gambaran model 2D bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas. Peralatan yang digunakan adalah ARES (*Automatic Resistivity System*) dengan kabel aktif untuk 32 elektroda jarak antar elektroda 5,5 meter dan kabel ekstensi untuk 9 elektroda dengan jarak antar elektroda 20 meter. Pengukuran posisi titik pengukuran menggunakan GPS Garmin dan beda ketinggian posisi elektroda menggunakan *Suunto Optical Height Meter*.

Survei Geolistrik Resistivitas. Metode geolistrik mengukur sifat kelistrikan material bumi dengan menginjeksikan arus listrik kedalam tanah menggunakan dua elektroda dan mengukur besaran tegangan menggunakan dua elektroda yang lainnya (Gambar 1). Rasio antara arus yang diinjeksikan dan tegangan yang terukur merupakan impedansi bumi yang dikonversi ke dalam bentuk resistivitas semu (ρ_a) berdasarkan prinsip Hukum Ohm [9].

$$\rho_a = k V / I \quad (1)$$

Nilai resistivitas semu sebagai fungsi konfigurasi pengukuran atau faktor geometri (k) kemudian diinversi secara numerik ke dalam bentuk model resistivitas sesungguhnya terhadap kedalaman[9].

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{RA}{l} \quad (2)$$

Distribusi potensial di bawah permukaan yang disebabkan oleh sumber titik di permukaan akan berupa ruang equipotensial seperti terlihat pada Gambar 2, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3)$$

dengan $V(r)$ adalah distribusi potensial sebagai fungsi jarak dari pusat sumber di permukaan ke jangkauan setengah bola di dalam bumi (r)

Untuk kasus real di mana digunakan dua elektroda arus C1(+) dan C2(-) di permukaan terbentang sebelah kiri dan kanan titik pusat O dengan jarak r_{c1} dan r_{c2} maka diperoleh persamaan (4).

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right) \quad (4)$$

Untuk konfigurasi dengan dua pasang elektroda, masing-masing pasangan elektroda arus (C1 dan C2) dan pasangan elektroda tegangan (P1 dan P2) seperti terlihat pada Gambar 2, maka beda potensial antara titik P1 dan P2 dinyatakan dalam persamaan (5),

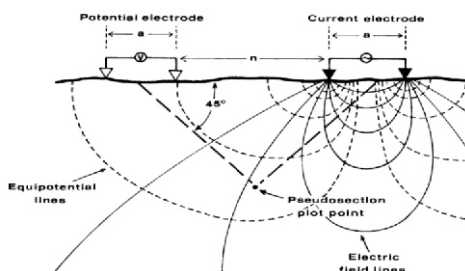
$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C1P1} - \frac{1}{C2P1} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{C2P2} \right) \quad (5)$$

Sehingga resistivitas semu (harga ρ yang merupakan representasi nilai resistivitas bawah tanah yang bervariasi ke dalam satu nilai homogen) pada persamaan (2) dapat ditulis kembali dalam bentuk,

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

(k) adalah faktor geometri yang tergantung pada konfigurasi keempat elektroda.

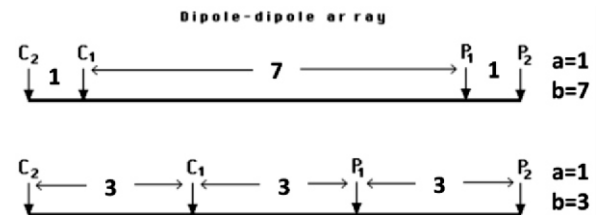
$$k = 2\pi / \left(\frac{1}{C1P1} - \frac{1}{C2P1} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{C2P2} \right) \quad (7)$$



Gambar 2. Arus equipotensial dari dua titik sumber dipermukaan bumi dengan ilustrasi konfigurasi dipole-dipole. P1, P2 sebagai elektroda potensial dan C1, C2 sebagai elektroda arus[10]

Hasil penelitian resolusi dan efisiensi dari 10 konfigurasi elektroda dalam studi model numerik.mendapatkan bahwa konfigurasi *dipole-dipole*, *pole-dipole* dan gradien mempunyai resolusi terbaik namun sangat sensitif terhadap *noise*[11]. Sehingga untuk survey resistivitas 2D disarankan melakukan pengukuran dengan kerapatan data yang tinggi menggunakan konfigurasi *dipole-dipole*, *pole-dipole* atau gradien. Konfigurasi *Dipole-dipole* merupakan susunan dan posisi elektroda seperti pada Gambar 3, dengan nilai K dapat dihitung dengan persamaan 7.

$$K = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (8)$$



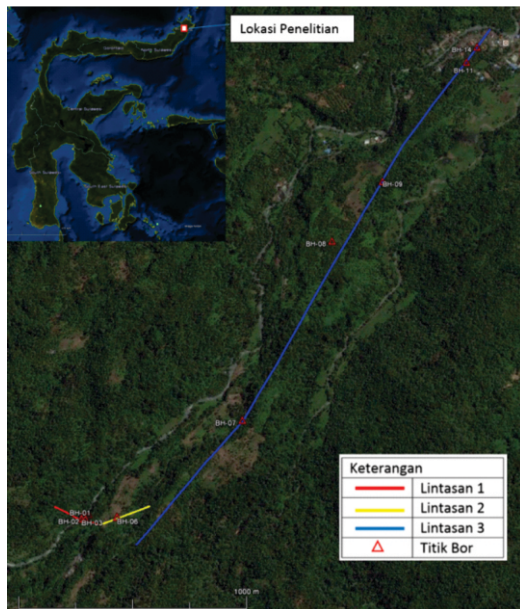
Gambar 3. Dua tipe konfigurasi dipole-dipole yang berbeda dalam panjang bentangan yang sama tetapi berbeda faktor “a” dan “n”. P1, P2 sebagai elektroda potensial dan C1, C2 sebagai elektroda arus[3]

Pengambilan Data. Dalam survei ERT ini, pengambilan data dilakukan menggunakan konfigurasi *dipole-dipole* dan dibagi menjadi tiga lintasan (Gambar 4). Lintasan 1 (Bendung/Dam) dengan panjang lintasan 220 m, lintasan 2 (Terowongan/Tunnel) panjang lintasan 240 m dan lintasan 3 (Tunnel–Tailrace) panjang lintasan 2.900 m, sehingga total lintasan survei adalah 3360 m. Lintasan survey ERT ini melewati 6 titik bor yang hasilnya dikorelasikan dalam interpretasi. Lintasan 1 melewati titik bor BH3, Lintasan 2 melewati titik bor BH6 dan Lintasan 3 melewati titik bor BH7, BH8, BH9 serta BH14.

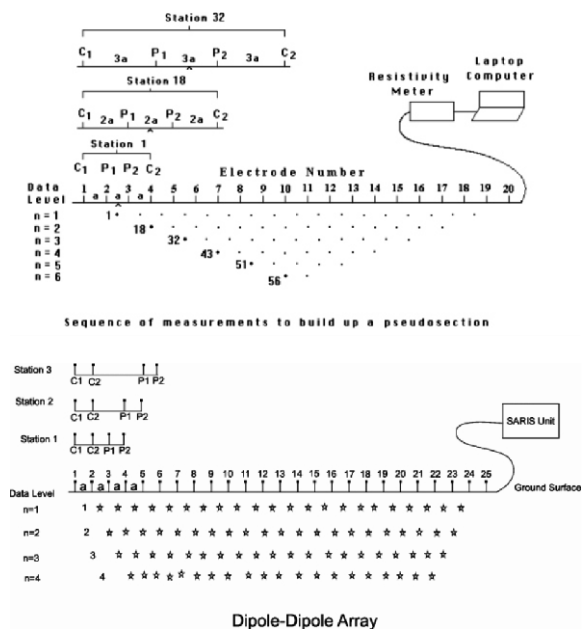
Pada lintasan 1 dan lintasan 2 pengambilan data menggunakan kabel aktif untuk 32 elektroda, jarak spasi antar elektroda 5,5 m dan panjang bentangan maksimum mencapai 170,5 m. Sekuen pertama pengukuran dimulai dengan jarak antara elektroda (a) 5,5 m dan jarak antara pasangan dipole (n) juga 5,5 m kemudian bergeser ke elektroda kedua sampai sepanjang bentangan kabel.

Untuk meningkatkan kedalaman penyelidikan, jarak antara pasangan dipole (n) ditingkatkan dari $1n$, $2n$, $3n$ dan $4n$. Sedangkan untuk menghindari adanya penurunan kekuatan sinyal akibat peningkatan jarak n , maka nilai a diperbesar pada sekuen pengukuran berikutnya. Sekuen kedua jarak antara elektroda adalah 16,5 m, sekuen ketiga jarak antar elektroda adalah 27,5 m dan sekuen keempat jarak antar elektroda adalah 38,5 m (Gambar 5).

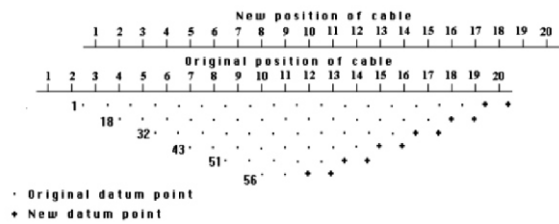
Untuk memperpanjang daerah cakupan sesuai lintasan target yaitu dengan metode *roll-along*, yaitu kabel digeser ke beberapa satuan jarak elektroda. Semua pengukuran yang melibatkan elektroda pada bagian kabel yang tidak tumpang tindih (*overlapping*) akan diulang (Gambar 6).



Gambar 4. Peta lintasan survey ERT



Gambar 5. Pengaturan elektroda dalam survei resistivitas 2-D dan sekuen pengukuran yang digunakan untuk membentuk pseudosection[3]



Gambar 6. Penggunaan metode *roll-along* untuk memperluas wilayah yang dicakup dalam survei[3]

Pada lintasan 3 pengambilan data menggunakan kabel *extension* untuk 9 elektroda tegangan dan 2 elektroda arus, jarak spasi antar elektroda adalah 20 m dengan panjang bentangan maksimum mencapai 200 m. Pengukuran dimulai dengan jarak antara elektroda (a) 20 m dan jarak antara pasangan dipole (n) ditingkatkan dari 1n, 2n, 3n, 4n, 5n dan 6n, kemudian bergeser ke satuan jarak elektroda (20 m) sampai sepanjang lintasan target.

Pengolahan Data. Pengolahan data dilakukan menggunakan software **RES2DINV** dari Geotomo Software, pengolahan dimulai dengan seleksi data yang terpengaruh oleh *noise*. Penghilangan data secara manual dengan mematikan data pada titik datum yang jelek *exterminate bad datum points*. Untuk penempatan titik plot data pemetaan 2D digunakan metode *contouring pseudosection* nilai resistivitas semu. Lokasi horisontal titik data dari titik ditempatkan di titik tengah dari pasangan elektroda dan posisi vertikal titik data ditempatkan pada kedalaman rata-rata pengukuran[12]. Kemudian dilakukan inversi untuk mendapatkan model penampang bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas.

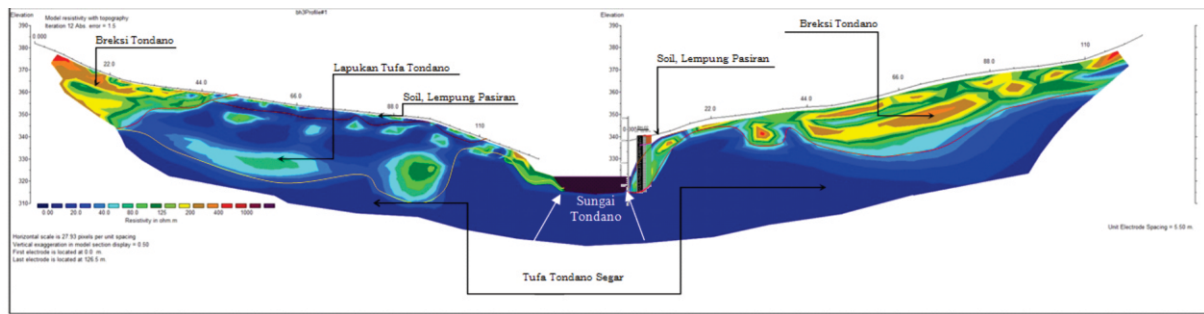
3. Hasil Dan Pembahasan

Hasil pengolahan data dengan software **RES2DINV**[13] ditampilkan dalam penampang model bawah permukaan. Untuk interpretasi jenis litologi selain berdasarkan informasi nilai resistivitas batuan dan material tanah[14] juga dikorelasikan dengan data lubang bor terdekat. Korelasi informasi geologi, nilai resistivitas batuan dan hasil lubang bor akan memberikan interpretasi yang realistis.

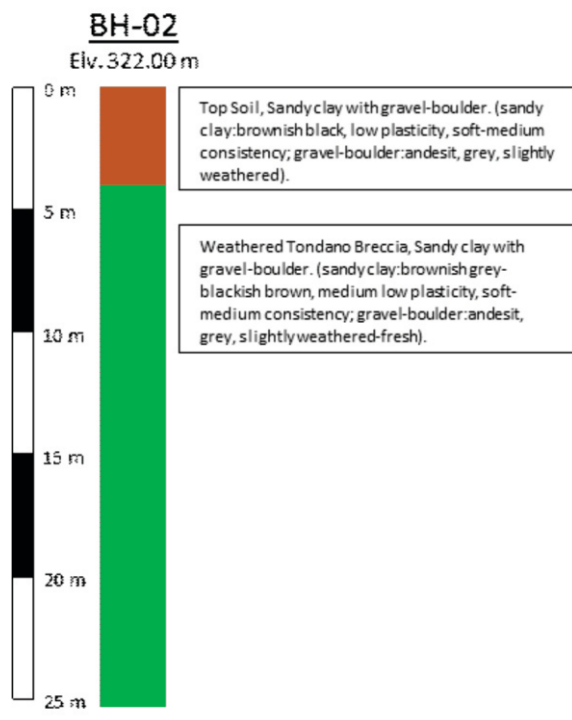
Lintasan 1 (Dam). Berdasarkan pengukuran resistivitas 2D pada lintasan 1 (Gambar 7) dan informasi pemboran BH-2 (Gambar 8), bisa diinterpretasikan bahwa pada lokasi rencana *dam* (bendung) ini tersusun oleh lapisan tanah (*soil*) berupa lempung pasir (resistivitas rendah di permukaan), breksi Tondano (resistivitas 30 – 1000 Ω m), lapukan tufa Tondano (30 – 80 Ω m) dan tufa Tondano (< 30 Ω m). Satuan breksi Tondano terdiri dari fragmen berupa andesit dengan ukuran berangkal bongkah dengan matriks berupa tufa. Pada

awal lintasan jarak 0 – 46,75 meter terdapat breksi Tondano sampai di permukaan. Pada jarak 46,75 meter sampai 118,25 meter litologi berupa lapisan

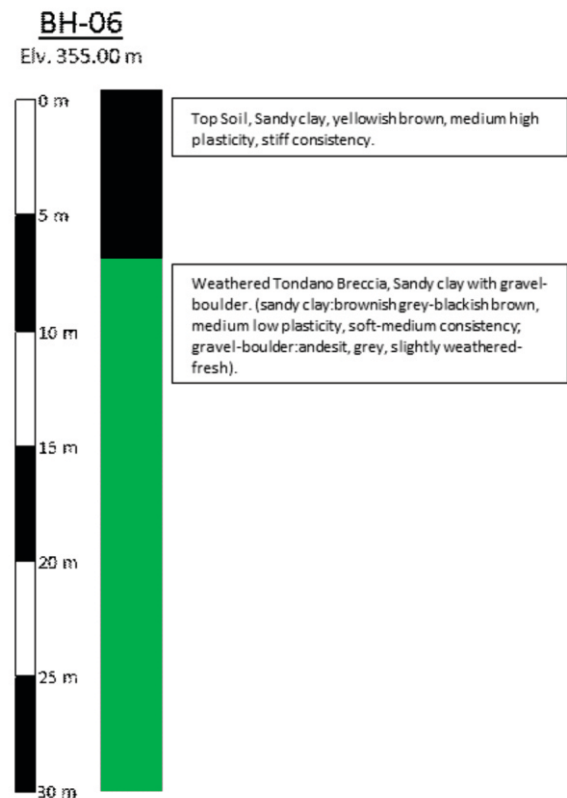
tanah (lempung pasir) setebal 5 meter, dibawahnya terdapat lapukan tufa Tondano sampai kedalam 35 meter dan dibawahnya tufa Tondano.



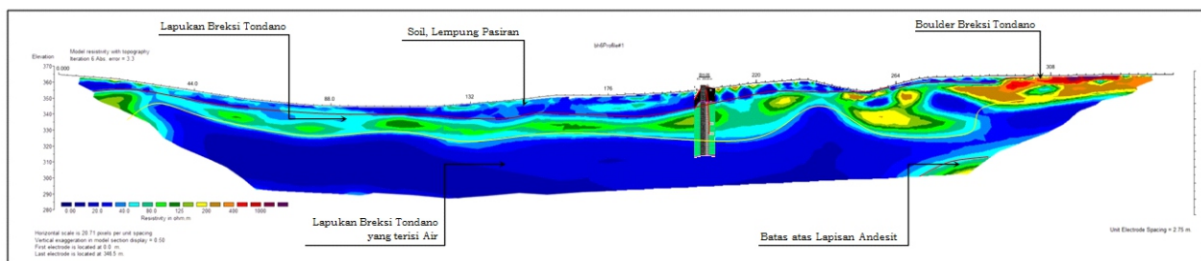
Gambar 7. Penampang 2D resistivitas batuan pada lintasan 1 di daerah bendung (DAM)



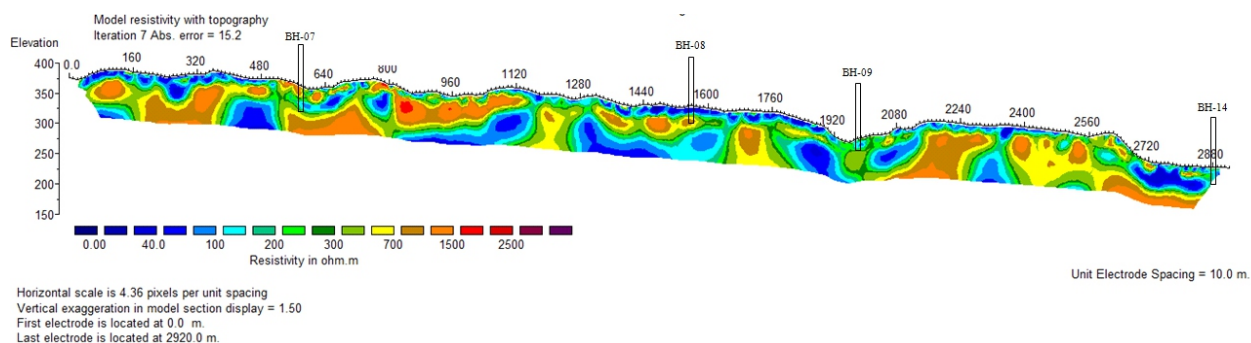
Gambar 8. Informasi batuan pada pemboran BH-2



Gambar 9. Informasi batuan pada pemboran BH-6



Gambar 10. Penampang 2D resistivitas batuan pada lintasan 2 di daerah tunnel



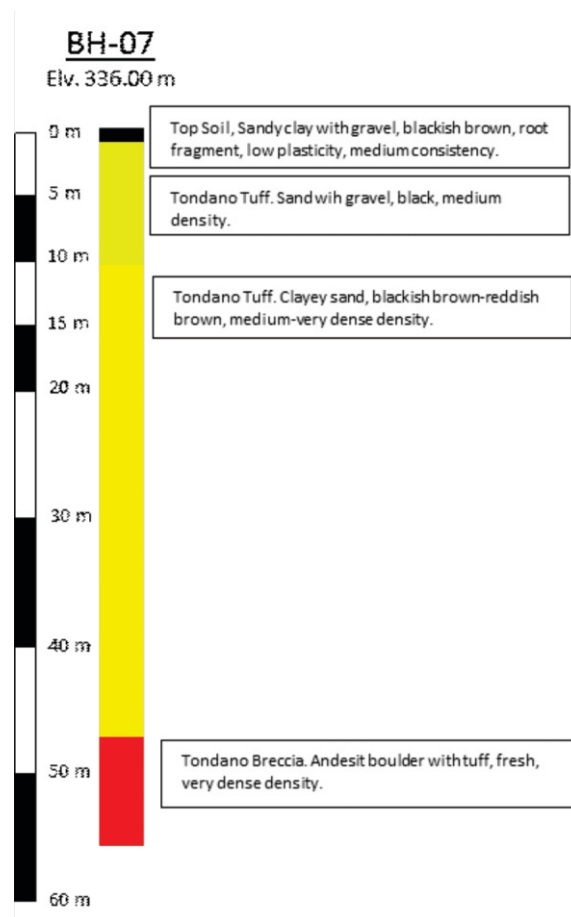
Gambar 11. Penampang 2D resistivitas batuan pada lintasan 3 di daerah *tunnel* hingga *tailrace*.

Pada bagian tepi sungai terdapat lapisan tanah tipis dan breksi Tondano. Pada sebelah tenggara sungai, terdapat lapisan tanah tipis 3 meter, dibawahnya terdapat breksi Tondano sampai ketebalan 25 meter. Di bawah breksi Tondano terdapat tufa Tondano.

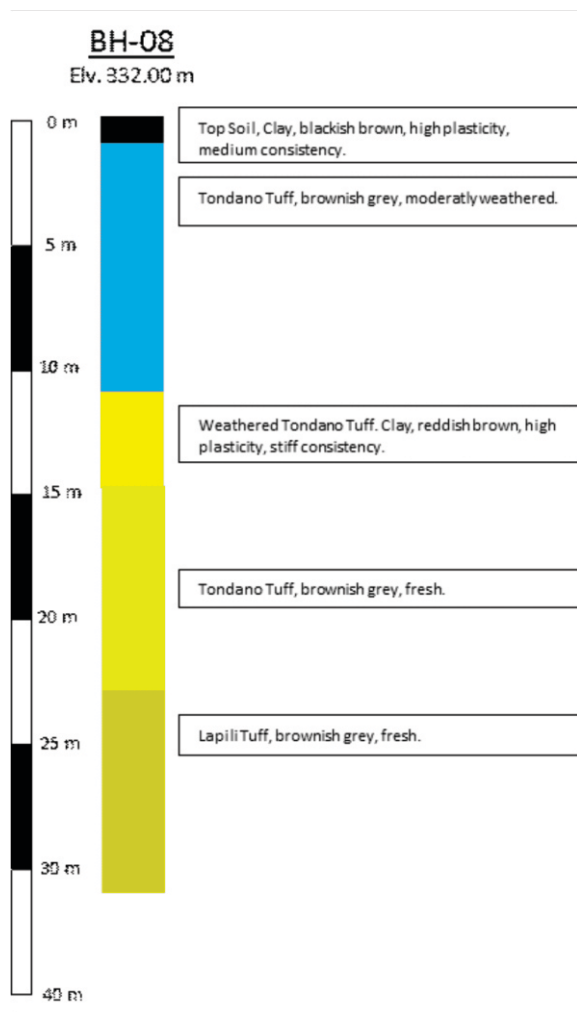
Lintasan 2 (Tunnel). Hasil penampang resistivitas 2D lintasan 2 (Gambar 10) dan hasil data bor pada BH-6 (Gambar 9) menunjukkan bahwa lapisan Tondano pada lokasi rencana *tunnel* (kanal) telah mengalami pelapukan menjadi lempung pasir mencapai ketebalan hingga 15 m (resistivitas rendah di permukaan), sedangkan lapisan dibawahnya berupa breksi Tondano yang telah lapuk menjadi pasir kelekungan dengan fragmen kerikil ($40 - 125 \Omega m$) hingga bongkah ($200 - 2000 \Omega m$) mencapai ketebalan 10 – 35 meter, pada bagian akhir lintasan di jarak 291,5 meter, bongkah breksi Tondano sampai ke permukaan. Lapisan dibawahnya ada lapukan breksi Tondano yang terisi oleh air sehingga nilai resistivitasnya rendah ($< 30 \Omega m$).

Lintasan 3 (Tunnel – Tailrace). Lintasan 3 melintasi *tunnel* hingga *powerhouse* (Gambar 11). Daerah *tunnel* terdapat titik pemboran yaitu BH-7 (Gambar 12), daerah *surge tank* terdapat titik pemboran BH-8 (Gambar 13), Di daerah *penstock* terdapat pemboran BH-9 (Gambar 14) dan pada daerah *tailrace* ada pemboran titik BH-14 (Gambar 15). Untuk melihat lebih detil formasi batuan berdasarkan nilai resistivitasnya, maka lintasan dibagi menjadi 3 bagian.

Bagian Pertama Lintasan 3 (Tunnel). Pada bagian pertama dari lintasan 3 (Gambar 16) terdapat titik pengeboran BH-77 (Gambar 13), litologinya tersusun atas *soil* yang berupa lempung pasir dan pasir ($< 30 \Omega m$) dan tufa Tondano yang sebagian sudah mulai lapuk, lapisan ini ditemukan hingga kedalaman 47,8 m. Pada kedalaman 50 m ditemukan intrusi andesit ($1000 - 1500 \Omega m$). Pada batuan andesit ada kekar yang diisi oleh air yang berasal dari akuifer di kedalaman 25 meter. Di jarak 820 meter dibawah lapukan tufa ditemukan tufa yang kompak.



Gambar 12. Informasi batuan pada pemboran BH-7



Gambar 13. Informasi batuan pada pemboran BH-8

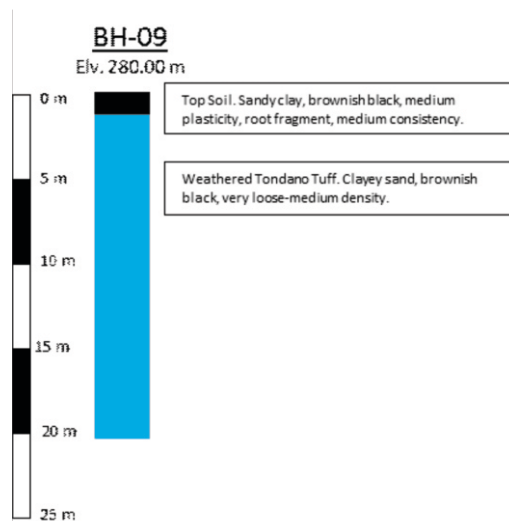
Bagian Kedua Lintasan 3 (Surgetank – Penstock). Gambar 16 menunjukkan penampang resistivitas batuan dan pemboran BH-8 (Gambar 13) pada lokasi rencana *surgetank*, dari hasil ini dapat diketahui jenis litologinya tersusun oleh lapisan lempung dan lempung pasir yang merupakan hasil pelapukan dari tufa ($< 30 \Omega m$), lapisan ini memiliki ketebalan hingga 10 m. Di bawah lapisan ini berupa lapukan tufa (100 - 200 Ωm), kemudian lapisan yang paling bawah berupa tufa lapili yang masih fresh dan kompak (500 - 1500 Ωm). Akuifer ditemukan pada jarak 1090 – 1160 meter di kedalaman 55 meter dan pada jarak 1280 – 1350 meter di kedalaman 60 meter ($< 30 \Omega m$).

Hasil pengukuran resistivitas batuan yang telah dilakukan dan informasi dua titik pemboran BH-9 (Gambar 14) dan BH-10 hingga kedalaman 20 m menunjukkan bahwa lokasi rencana *penstock* termasuk dalam satuan tufa Tondano. Tufa Tondano yang berada pada daerah ini dalam kondisi telah mengalami pelapukan dan terdekomposisi menjadi lapisan tanah yang cukup tebal ($< 30 \Omega m$). Lapisan tanah ini merupakan hasil pelapukan dari satuan tufa Tondano. Pada jarak 1840 – 1930 meter ditemukan akuifer pada kedalaman 20 meter.

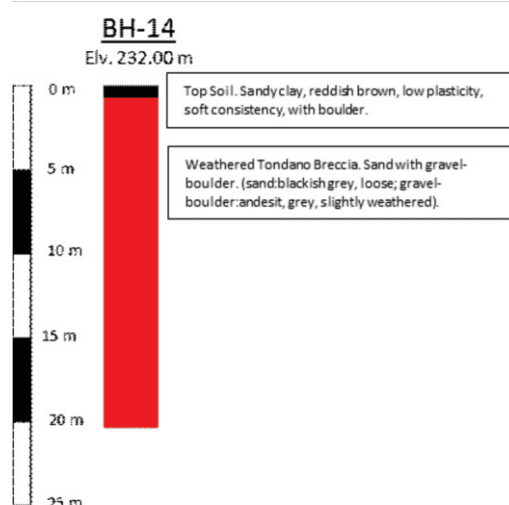
Bagian Ketiga Lintasan 3 (Powerhouse – Tailrace).

Berdasarkan penampang resistivitas batuan pada bagian ketiga di lintasan 3 (Gambar 18), litologi bawah permukaan lokasi rencana pembangunan *powerhouse* berupa lempung pasir, lapukan breksi dan breksi. Pada jarak 1960 – 2110 meter di permukaan terdapat lapisan tanah yang merupakan hasil dari lapukan tufa sampai kedalaman 30 meter ($< 30 \Omega m$) dan di bawahnya terdapat akuifer sampai kedalaman 50 meter. Di bawah akuifer terdapat lapukan breksi dengan ketebalan 20 meter dan di lapisan bawahnya adalah breksi Tondano (500 - 2500 Ωm). Akuifer ditemukan pada jarak 2280 – 2360 meter di kedalaman 80 meter.

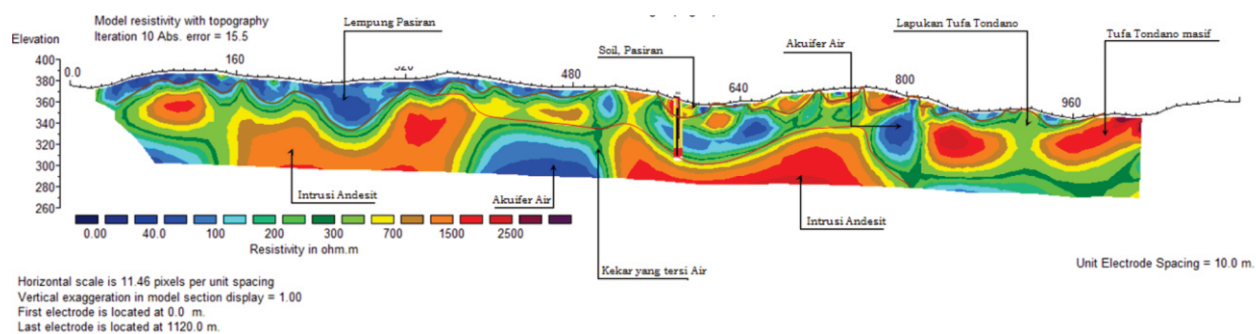
Pada lokasi rencana *tailrace* dapat diketahui kondisi litologi bawah permukaan yaitu berupa lempung kepasiran, pasir kelempungan hingga pasir dengan campuran kerikil sampai bongkah. Akuifer ditemukan pada jarak 2680 – 2860 meter sampai kedalaman 60 meter. Pada daerah *tailrace* terdapat pemboran sebanyak 2 titik yaitu BH-13 dan BH-14 (Gambar 15) hingga kedalaman 20 m.



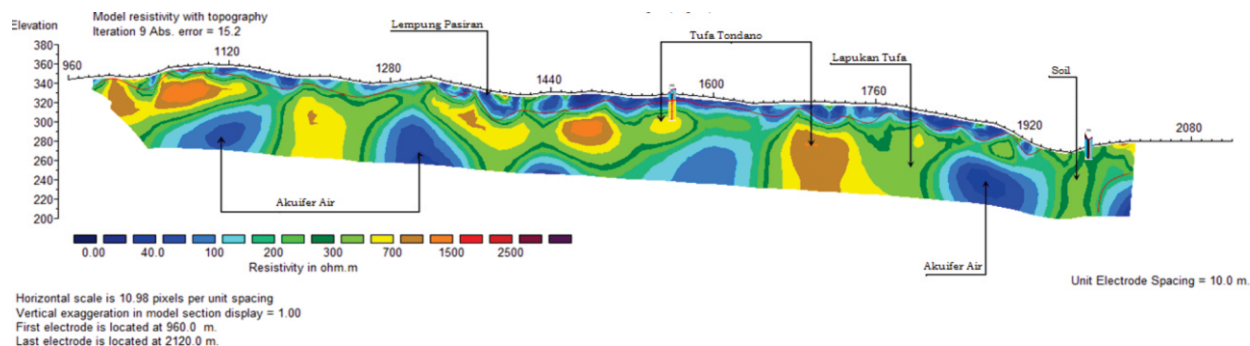
Gambar 14. Informasi batuan pada pemboran BH-9



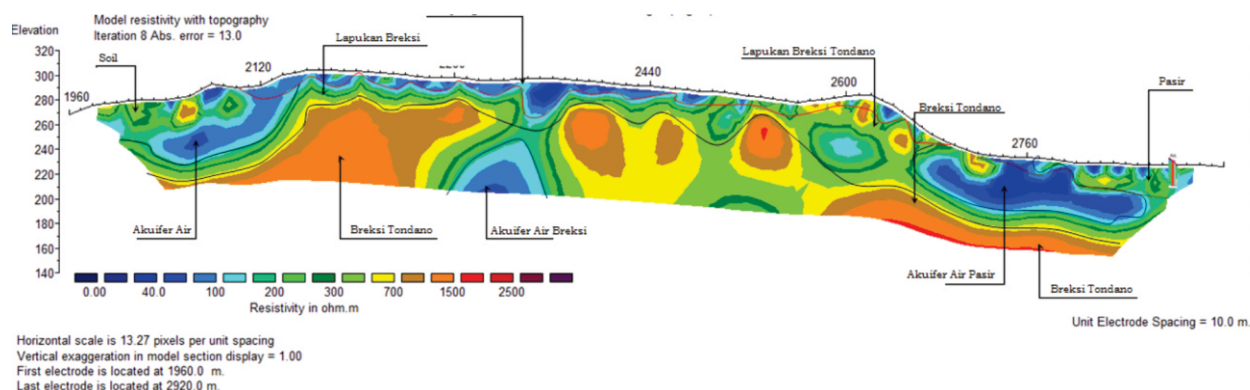
Gambar 15. Informasi batuan pada pemboran BH-14



Gambar 16. Penampang 2D resistivitas batuan pada bagian pertama lintasan 3 (*tunnel*)



Gambar 17. Penampang 2D resistivitas batuan pada bagian kedua lintasan 3 (*surge tank - penstock*)



Gambar 18. Penampang 2D resistivitas batuan pada bagian ketiga lintasan 3 (*power house - tailrace*)

4. Kesimpulan

Berdasarkan tomografi resistivitas listrik (ERT) bisa diinterpretasikan bahwa area rencana pembangunan bendung dan terowongan di Sulawesi Utara tersusun oleh lapisan tanah berupa lempung pasir (resistivitas rendah di permukaan), breksi Tondano ($30 - 1000 \Omega\text{m}$), lapukan tufa tondano ($30 - 80 \Omega\text{m}$) dan tufa tondano ($< 30 \Omega\text{m}$). Di lokasi rencanabendung (*dam*) pada bagian tepi sungai terdapat lapisan tanah tipis, breksi tondano dan di bawahnya terdapat tufa Tondano. Lapisan Tondano daerah terowongan (*tunnel*) telah mengalami pelapukan menjadi lempung pasir mencapai ketebalan hingga 15 m, sedangkan lapisan dibawahnya berupa breksi tondano yang telah lapuk menjadi pasir kelemungan dengan fragmen kerikil ($40 - 125 \Omega\text{m}$) hingga bongkah ($200 - 2000 \Omega\text{m}$) mencapai ketebalan 10–35 meter. Pada kedalaman 50

m ditemukan intrusi andesit, kekar-kekar pada andesit diisi oleh air. Terdapat setidaknya ada lima akuifer dengan kedalaman sekitar 50 meter diantara lokasi rencana *surgetank* sampai *powerhouse*. Akuifer juga ditemukan pada akhir lintasan 3 yaitu pada lokasi rencana *tailrace*.

Daftar Pustaka

- [1] Hazreek, M.B.Z.A., Rosli, B. S. and Fauziah, B.A., Wijeyesekera, D.C., Faizal, M.B.T.B. (2012). *Integral Analysis of Geoelectrical (Resistivity) and Geotechnical (SPT) Data In Slope Stability Assessment*. Academic Journal of Science, 1(2):305–316 (2012)
- [2] Siddiqui, F.I. and Azhar, S.B.B.S.O. (2012). *Integrating Geo-Electrical and Geotechnical Data for Soil Characterization*. International Journal of

- Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, No. 2, March 2012
- [3] Loke M. H., 2000. Electrical Imaging Surveys For Environmental and Engineering Studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Geotomo Software, Penang, Malaysia
- [4] Suntoko, H., Mauritz, L.T. (2006). *Penyelidikan Geoteknik untuk Pondasi Dangkal di Calon Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Daerah Ujung Lemahabang*. Prosiding Seminar Nasional ke-12 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir. Yogyakarta, 12 -13 September 2006
- [5] Elzein, M.E.A., Guoqiang, X. and Hai, L.(2012). *Geoelectrical Measurements to Investigate the Bridge Sites*. 1 : 4 9 8 . doi:10.4172/scientificreports.498
- [6] Syamsurizal, Cari, Darsono. (2013). *Aplikasi Metode Resistivitas Untuk Identifikasi Litologi Batuan Sebagai Studi Awal Kegiatan Pembangunan Pondasi Gedung*. Indonesian Journal of Applied Physics (2013) Vol.3 No.1 halaman 99-106
- [7] Owoyemi, S. I., Ojo, M. O.(2012). *Geoelectric Investigation of The Hydrological Characteristics of The Fractured Basement Complex Over Igem City In Ibadan, Nigeria*. Journal of Environmental Issues and Agriculture in Developing Countries Vol. 4, No. 1, April 2012
- [8] Nicaise, Y., Gérard, A.F., Flavien, D., Emmanuel, L.A. and Ibrahim, G.Y.R.D.(2014). *Estimation of an Unconfined Sandy Aquifer Parameters Using Gravimetric and Geoelectrical Methods*. International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM) (2276-6618) Vol. 4(1) pp. 20-28, January, 2014
- [9] Telford, M.W., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. & Keys, D.A. (1976). Applied geophysics, New York: Cambridge University Press.
- [10] Ogungbe, A.S., Olowofela, J.A., Da-Silva, O.J., Alabi, A.A. and Onori, E.O.(2010). *Subsurface Characterization using Electrical Resistivity(Dipole-Dipole) method at Lagos State University (LASU) Foundation School, Badagry*. Advances in Applied Science Research, 2010, 1 (1): 174-181. Nigeria
- [11] Dahlin T, Zhou B (2004). *A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging With 10 Electrode Arrays*. Geophysical Prospecting 52: 379– 398.
- [12] Edwards, L.S.(1977). *A Modified Pseudosection For Resistivity and IP*. Geophysics, v. 42, no. 5, p. 1020-1036
- [13] RES2DINV AND RES3DINV Rapid 2D & 3D Resistivity and IP Inversion (2010). Geotomo Software Malaysia.
- [14] Keller, G.V & Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in Geophysical Prospecting. Oxford: Pergamon Press. 517p.