**Title:***OhmPiSimple: Off-the-shelf 4-probe instrument for resistivity imaging in the laboratory for educational purposes*

**Authors:**  A.D. Garnadi(a), M.F. Ulum(b)1, D.Kurniadi(c), U. Mukhaiyar(d), L. Choridah(e), N.H. Setyawan(e), K. Ain(f), M.N. Indro(g)

**Affiliations:**

aRonin, bFKH IPB, cFTI ITB, dFMIPA ITB, eFKKMK UGM, fFST UNAIR, gFMIPA IPB

**Contact email:** *[Include institutional email address of the corresponding author]*

*ulum@ipb.ac.id*

**Abstract:** *[Max. 200 words.]*

*Electrical resistivity tomography is a technique widely used in imaging technology for various disciplines, and one of emerging technology. For example, in recent years, the use in laboratory or field experiments for environmental purposes is increasing. In the meantime, the development of commercial instruments more focused on the measurements quality and their robustness. OhmPiSimple presents the development of a low-cost, open hardware resistivity meter with robust and flexible tool for small-scale experiments.*

*This article presents the development of a low-cost, open hardware resistivity meter from off-the-shelf components to provide the scientific community with a simple tool for educational purposes. This basic resistivity meter features current injection and measurement functions associated with two affordable multimeters that allows performing manual measurements with up to 32 electrodes position based on quadrupole measurement (at a cost of less than USD 150, even less for labs owning multimeters such as in Basic Physics or Basic Electronics labs).*

*The device validated using four cases in a practical laboratory, related to pedagogy in environmental physics, material science, veterinary science, and food engineering.*

**Keywords:** *[At least 3 keywords.] There is no limit on the no. of keywords you can list. Electrical resistivity imaging, Electrical resistivity, Quadrupole, Resistivity meter, simple 4-probe electrical tomography instrument, Wenner configuration*

**Abstrak:**

Tomografi resistivitas (TR) merupakan teknik non-destruktif yang digunakan di berbagai disiplin ilmu untuk mendapatkan informasi berdasarkan sifat kelistrikan yaitu resistivitas, serta merupakan salah satu teknologi yang terus berkembang. Sebagai contoh, di bidang lingkungan dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan TR di laboratorium atau percobaan lapangan untuk tujuan lingkungan semakin meningkat. Sementara itu, instrumen komersial lebih difokuskan pada kualitas pengukuran dan ketangguhannya. OhmPiSimple menyajikan perangkat keras terbuka pengukur resistivitas yang berbiaya rendah untuk eksperimen skala kecil yang ditujukan untuk pendidikan.

Artikel ini menyajikan pengembangan pengukur resistivitas perangkat keras terbuka berbiaya rendah dari komponen yang tersedia untuk menyediakan komunitas ilmiah dengan alat sederhana untuk tujuan pendidikan. Pengukur resistivitas dasar ini memiliki fungsi injeksi dan pengukuran arus yang terkait dengan dua multimeter terjangkau yang memungkinkan melakukan pengukuran manual dengan hingga 32 posisi elektroda berdasarkan pengukuran quadrupole (dengan biaya kurang dari USD 150, bahkan lebih murah untuk laboratorium yang memiliki multimeter seperti di Basic laboratorium Fisika atau Elektronika Dasar).

Perangkat divalidasi menggunakan empat kasus di laboratorium praktik, terkait pedagogi fisika lingkungan, ilmu material, ilmu kedokteran hewan, dan teknik pangan.

**Kata Kunci:**  *Pencitraan resistivitas listrik, Resistivitas listrik, Quadrupole, Pengukur resistivitas, instrumen tomografi listrik 4 probe sederhana, konfigurasi Wenner*

# The hardware in context

Dalam tulisan ini, studi feasibilitas penggunaan Tomografi Resistivitas Listrik dengan menggunakan instrumen 4-probe sederhana sebagia alat pengajaran maupun sebagai alat untuk melakukan studi pendahuluan NDT di meja laboratorium.

Pengukuran citra dari resistansi salah satunya menggunakan metode electrical resistivity tomography (ERT). Metode ERT adalah metode geofisika non-destruktif, telah digunakan dalam berbagai topik penelitian, misalnya dalam sedimentologi, hidrologi, geoarkeologi dan sebagian besar ERT digunakan di lingkungan yang lembab hingga semi kering, di mana setidaknya beberapa kelembaban bawah bahan/material menjamin konduktivitas yang andal (Herzog, et.al 2019). Metode ERT mempunyai beberapa teknik konfigurasi diantaranya Wenner – Schlumberger, Wenner, dipole - dipole, dan pole – pole (Seaton 2002).

Berdasarkan beberapa teknik konfigurasi, dipilih konfigurasi Wenner karena pendekatan yang paling umum digunakan untuk aplikasi lapangan karena sederhana dan praktis (Salehi, et.al 2016). Pengukuran konduktivitas / resistivitas bahan/material dalam teknik konfigurasi Wenner menggunakan empat elektroda. Konfigurasi elektroda Wenner digunakan untuk mendapatkan nilai resistivitas yang tampak (Jiao-Jun, et.al 2007)

Pengujian yang dilakukan adalah pengukuran dengan empat probe menggunakan konfigurasi Wenner. Mengingat perangkat empat-probe ini ditujukan untuk tujuan pedagogis, maka jumlah data pengukuran tidak masuk ke katagori besar. Dengan demikian, perangkat RESINV2D yang biasa digunakan untuk geolistrik, dapat digunakan dalam versi demonya tanpa perlu membeli lisensinya, dan dapat mengolah data untuk konfigurasi Wenner.

## Tujuan

1. Alat ukur sederhana dan murah untuk memetakan citra distribusi resistivitas bahan di Laboratorium untuk pendidikan.
2. Perkakas elektronika dapat diperoleh di bengkel elektronika, maupun toko reparasi elektronika. Bahkan dapat dibeli secara on-line.

## Manfaat

 Diharapkan tulisan ini dapat menjadi referensi untuk pembuatan instrumen atau alat ukur untuk pengajaran bidang non-destruktif dengan menggunakan prinsip sifat kelistrikan bahan.

## Electrical Resistivity Tomography

Metode geolistrik merupakan metode yang digunakan untuk mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi dengan cara mendeteksinya di permukaan bumi (Lilik, H 1990). Prinsip kerja metode geolistrik dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik ke permukaan bahan/material melalui sepasang elektroda dan mengukur beda potensial dengan sepasang elektroda yang lain. Hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu, dapat ditentukan variasi harga hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah titik ukur.

Metoda geolistrik tahanan jenis memberikan kontras nilai sifat kelistrikan kandungan tanah. Teknik Electrical Resistivity Tomography (ERT) digunakan untuk mendapatkan kontras tahanan jenis bawah permukaan yang lebih teliti. Teknik ini memberikan gambaran seperti sayatan bawah permukaan secara vertikal(Wijatmoko, et.al 2012) . Penggunaan teknik tomografi resistivitas listrik memberikan gambar listrik bahan/material bawah permukaan dan telah menjadi alat penting untuk karakterisasi listrik tanah. Korelasi antara parameter listrik dan kekuatan tanah, yang berasal dari tes geoteknik, dapat dipelajari dengan memilih parameter listrik yang berbeda (Sudha, et.al 2009).

 Nilai resistivitas bahan/material dapat dipengaruhi oleh kondisi bahan/material yang dibedakan menjadi faktor internal maupun eksternal. Faktor internal merupakan pengaruh alamiah yang berasal dari dalam tanah, seperti kandungan kimia, luas tanah, kedalaman tanah, kadar air di dalam bahan/material dan kadar kandungan garam di dalam tanah. Faktor eksternal merupakan pengaruh yang berasal dari luar akibat adanya suhu dan kelembaban.

Survei resistivitas arus DC, sumber energinya adalah generator yang menginjeksikan arus konstan ke dalam bahan/material menggunakan dua elektroda. "Sinyal keluar" (data) adalah tegangan yang diukur di berbagai tempat di permukaan, bersama dengan kekuatan sumber arus yang diketahui dan detail tentang geometri relatif dari empat elektroda. Cara membuat peta atau grafik data mentah untuk penilaian kualitas atau untuk interpretasi langsung, pengukuran diubah ke dalam bentuk yang terkait dengan properti fisik yang relevan. Setiap pengukuran, Hukum Ohm digunakan untuk menghasilkan datum dengan satuan resistivitas (atau konduktivitas). Data yang diubah ini disebut resistivitas semu karena data mewakili resistivitas sebenarnya bumi hanya jika tanahnya seragam dalam rentang pengukuran. Resistivitas bawah permukaan bahan/material bervariasi, interpretasi harus didasarkan pada cara di mana resistivitas semu bervariasi sebagai fungsi geometri dan posisi elektroda.

Gambar 1 Pola sirkuit listrik pada pengukuran metode geolistrik (a)anggapan adanya hambatan pada bahan/material (b) garis-garis medan listrik yang terjadi

Prinsip ini sama halnya dengan menganggap bahwa material bumi memiliki sifat resistif atau seperti perilaku resistor, dimana material-materialnya memiliki kemampuan yang berbeda dalam menghantarkan arus listrik. (Kanata, B 2008). Hubungan antara pengukuran (I, V, geometri) dan resistivitas dengan adanya hubungan potensial karena sumber titik arus dalam media seragam tanpa batas gambar 1(b). Hal ini akan terlihat seperti hukum Ohm dengan penambahan suku yang melibatkan jarak antara sumber dan lokasi pengukuran potensial. Selanjutnya, potensi karena dua sumber (sebenarnya, sumber dan penyerap) adalah superposisi potensi karena masing-masing maka harus membuat pengukuran potensial menggunakan dua elektroda, ekspresi beda potensial dapat diturunkan sebagai perbedaan antara hubungan potensial pada elektroda tunggal (Jones F 2007).

Gambar 2 Tegangan terukur untuk setiap pengaturan elektroda.

$∆V=\frac{Iρ}{2π}\{\frac{1}{rAM}-\frac{1}{rBM}-\frac{1}{rAN}+\frac{1}{rBN}\}$, (1)

$∆V=IρG$, (2)

G adalah geometri yang bergantung pada jenis konfigurasi yang dipakai saat pengukuran. Resistivitas semu bisa didapat dari perhitungan arus, beda potensial dan geometri dengan persamaan :

$ρ=\frac{∆V}{IG}$, (3)

Resistivitas semu adalah resistivitas yang diturunkan hanya menggunakan arus yang diketahui, tegangan terukur, dan geometri. Ini adalah resistivitas sejati bumi hanya jika bumi (dalam jangkauan pengukuran) adalah setengah ruang yang seragam. Ketika bumi lebih rumit, resistivitas semu yang diukur akan kurang dari maksimum dan lebih dari resistivitas minimum sebenarnya (atau intrinsik) yang berada dalam jangkauan (Jones F 2007).

## Konfigurasi Wenner

Konfigurasi ini diperkenalkan oleh Wenner (1915). Konfigurasi probe Wenner adalah satu dari pengaturan ini di mana keempat elektroda disejajarkan pada garis lurus pada jarak yang sama satu sama lain. Diasumsikan bahwa (1) domain pengukuran semi-tak terbatas, homogen dan isotropik, (2) elektroda memiliki nol bidang kontak permukaan ( Jiao-Jun, et.al 2007). Konfigurasi Wenner memiliki respons sinyal terbaik dan resolusi tinggi dari struktur vertikal ( Loke 2004). Konfigurasi Wenner adalah konfigurasi elektroda yang paling umum digunakan untuk resistivitas. Konfigurasi Wenner paling mudah untuk dijelaskan terkait prinsip kerja pengukuran. Hubungan sederhana antara semua kuantitas yang diketahui dan diukur dan properti fisik yang berguna, yaitu resistivitas semu. Hal ini membutuhkan nilai untuk faktor geometri berdasarkan geometri elektroda. G mudah ditemukan jika keempat jarak memiliki nilai yang sesuai (Jones F 2007). Misalnya, jika elektroda diberi jarak yang sama dengan jarak a, maka, dengan menggunakan gambar dan relasi untuk V:

$G=\frac{\frac{1}{a}-\frac{1}{2a}-\frac{1}{2a}+\frac{1}{a}}{2π}=\frac{1}{2π}a$, (4)

Konfigurasi Wenner menggunakan faktor geometri ini untuk mendapatkan resistivitas semu. Diketahui bahwa k=1/G, maka persamaan :

$k=2πa$, (5)

Gambar 3 Konfigurasi Wenner

Pengukuran resistivitas bahan/material dapat dilakukan dengan menyuntikkan arus I ke bumi di antara dua elektroda luar (+ I di C1(A) dan -I di C2(B)) dan mengukur tegangan yang dihasilkan ∆V antara dua probe potensial (P1(M) dan P2(N)) yang ditempatkan di sepanjang garis lurus antara elektroda injeksi saat ini. Resistansi nyata akan diperoleh:

$Rapp = k ∆V / I$, (6)

Pendekatan yang dilakukan untuk mendapatkan resistansi bahan/material (ρapp) dengan persamaan:

$ρapp = 2πaRapp,$ (7)

**Pseudosection atau penampang 2 dimensi saat membuat profil/penggambaran, potensi biasanya diukur pada beberapa posisi untuk setiap lokasi sumber saat ini. Hasil pemisahan yang lebih luas antara pasangan potensial dan pasangan arus memberikan informasi tentang struktur yang lebih dalam. Metode konvensional untuk memplot hasil tersebut adalah pseudosection, disebut demikian karena bukan penampang geologis yang sebenarnya. Nilai resistivitas semu diplot pada grafik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Sumbu vertikal mewakili jarak pemisahan, bukan kedalaman. Saat semua nilai diplot, hasilnya diberi kontur.

Gambar 4 Daerah sensitivitas RES2DINV untuk pola pengukuran dengan jarak antar elektrode a di permukaan tak hingga. Antara n-level terhadap depth, pada medium yang seragam.

# Deskripsi peralatan dan pengoperasian

## Peralatan dan harga

1. Alat yang digunakan untuk membuat instrument ini adalah : modul ltc 1871 (penguat tegangan DC/ booster step up converter regulated power supply), multimeter digital (di dalam hal ini, digunakan ZOTEK Z98) 2 buah , power supply 30 V ( baterai 9 V yang diperbesar tegangannya menjadi 30 V), paku/jarum/elektroda 4 buah, duplex, kabel secukupnya.
2. Harga: Total kurang dari Rp 2,5 juta, bahkan apabila dimiliki akses 2 multimeter, bisa kurang dari 750 ribu rupiah.
3. Untuk pengolahan data diperlukan computer, software RES2DINV versi demo, spreadsheet (misalnya Microsoft excel), editor text (misalnya Notepad), serta alat tulis.

|  |
| --- |
| Daftar Harga Perangkat Keras |
| Komponen | Jumlah unit | Harga satuan (IDR) | Sub-total (IDR) | Tautan |
| Step-up, Modul ltc 1871 | 1 | 148.000 | 148.000 | https://www.tokopedia.com/hikenace/dc-dc-ltc-1871-modul-sumber-daya-boost-100-w-output-3-5-35v-sm?whid=0 |
| Multimeter digital, ZOTEK Z98 | 2 | 155.000 | 310.000 | https://www.tokopedia.com/rajacell/digital-multimeter-zotek-zt98-cat-iii-auto-range-multitester-avo-meter?whid=0 |
| Baterai alkaline 9 V | 1 | 25.800 | 25.800 | https://www.tokopedia.com/ok-mart/abc-alkaline-9v-abc-alkaline-9-volt-abc-9volt-baterai-kotak-9v?whid=0 |
| Paku  | 4 | 2.000 | 8.000 | https://www.tokopedia.com/nagostore/klem-kabel-listrik-plastik-paku-beton-asli-ukuran-nomor-6-7-8-mm-4mm?whid=0 |
| Kabel jumper | 1 | 16.000 | 16.000 | https://www.tokopedia.com/easyware-id/30cm-kabel-jumper-arduino-cable-dupont-30cm-isi-40pcs-2-54mm-female-female?src=topads |
| Kabel jepit buaya | 1 | 17.000 | 17.000 | https://www.tokopedia.com/cncstorebandung/10set-10pcs-kabel-capit-buaya-alligator-aligator-clip-double-head-50cm?src=topads |
| Duplex  | 1 | 4.000 | 4.000 | https://www.tokopedia.com/trafficshop/karton-duplek-tebal-alas-papercraft-diorama-dan-bahan-kerajinan-tangan?whid=0 |
|  |  |  | 528.800 |  |

## Prosedur kerja/pengoperasian

Secara garis besar, dibagi menjadi 3 tahapan. Tahap pengukuran, dimana alat ukur dioperasikan, tahap pra-pengolahan data agar dapat diolah oleh RESINV2D, terakhir tahap pembangkitan citra hasil dari RESINV2D.

### Pengukuran



Gambar 5 Konsep operasional pengukuran

Gambar 5 merupakan konsep operasional pengukuran dengan konfigurasi Wenner yaitu arus listrik searah diinjeksi dari power supply ke elektroda C1(A) dan C2(B) serta mengukur beda potensial di elektroda P1(M)dan P2(N). Langkah selanjutnya melakukan pergeseran elektroda ke posisi yang lain kemudian mengukur kembali arus listrik dan beda potensial. Tahapan dalam pengukuran sebagai berikut :

1. Merangkai alat dan bahan seperti gambar 5.
2. Mengukur jarak antar elektroda panjang yang sama sesuai dengan kofigurasi Wenner
3. Menancapkan paku ke dalam bahan/material sebagai elektroda yang dihubungkan dengan multimeter
4. Memasang elektroda arus C1(A) dan C2(B) pada lintasan 0 cm dan 12 cm, sedangkan elektroda potensial P1(M) dan P2(N) pada lintasan 4 cm dan 8 cm.
5. Mengukur besar arus listrik dan beda potensial yang terbaca pada elektroda C1(A)-C2(B) dan elektroda P1(M)-P2(N).
6. Mencatat data yang didapat berupa nilai arus dan beda potensial pada multimeter, pada tabel yang sudah disediakan.
7. Menggeser setiap elektroda sebesar 1 cm ke kanan hingga ujung kanan wadah.
8. Mengulang langkah 4 sampai 7 dengan jarak yang berbeda, elektroda arus C1(A) dan C2(B) pada lintasan 0 cm dan 24 cm, sedangkan elektroda potensial P1(M) dan P2(N) pada lintasan 8 cm dan 16 cm.
9. Mengulang langkah 4 sampai 7 dengan jarak yang berbeda, elektroda arus C1(A) dan C2(B) pada lintasan 0 cm dan 36 cm, sedangkan elektroda potensial P1(M) dan P2(N) pada lintasan.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| No | C1(A)(m) | P1(M) (m) | P2(N)(m) | C2(B)(m) | *a*(m) | K(m) | V(V) | I(A) | R(Ω) |
| 1 | 0.01 | 0.05 | 0.09 | 0.13 | 0.04 | 1 | 0.0287 | 0.00039 | 73.58 |
| 2 | 0.02 | 0.06 | 0.1 | 0.14 | 0.04 | 1 | 0.029 | 0.00039 | 74.35 |
| 3 | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.15 | 0.04 | 1 | 0.0289 | 0.00039 | 74.1 |

### Pengolahan data di Notepad

Setelah melakukan pengolahan data di Microsoft Excel, langkah selanjutnya adalah dengan memasukkan data-data tersebut ke dalam notepad. Data hasil pengukuran disimpan dalam bentuk file \*.dat dengan data dalam file tersebut tersusun dalam susunan sebagai berikut.

Baris 1 : Nama pengukuran.

Baris 2 : Spasi elektroda terkecil.

Baris 3 : Tipe Pengukuran (Wenner = 1, Pole-pole = 2, Dipole-dipole = 3, Pole-Dipole = 4, Schlumberger = 7, Wenner-Schlumberger = 7).

Baris 4 : Jumlah total data.

Baris 5 : Tipe dari lokasi x titik datum. Masukkan 0 bila letak elektroda pertama diketahui. Gunakan 1 jika titik tengahnya diketahui.

Baris 6 : Ketik 1 untuk data IP (Induced Polarization) dan 0 untuk data resistivitas.

Baris 7 : Posisisi x, spasi elektroda terkecil, bilangan faktor n yang digunakan, dan resistivitas semu yang terukur untuk titik datum kedua dan seterusnya untuk titik datum berikutny

Keempat baris terakhir diberi dengan angka 0, selain itu untuk mempermudah dalam proses pengolahan, pada baris 8 ada baiknya diolah terlebih dahulu di Microsoft Excel sehingga pada proses pengolahannya data-data tidak diinput secara manual satu demi satu ke notepad ( Pebriyanto 2016, Loke 2004).

### Pengolahan data oleh program RES2DINV

Pengolahan data menggunakan software RES2DINV, pertama adalah membuka program tersebut, setelah itu pilih opsi “file” kemudian pilih “read data file” yang memasukkan data notepad yang telah diperoleh dalam pengukuran dengan nama format \*.dat lalu pilih oke dan pilih opsi “inversion” setelah itu “carry out inversion” untuk memilih file yang akan diketahui hasil inversi pengolahannya. Pilih opsi “save” agar data yang telah diatur dapat tersimpan, maka muncul gambar penampang hasil kalkulasi dan inversi data dengan pengolahan software RES2DINV. Kemudian terdapat pengaturan iterasi yang dapat diubah sesuai keinginan, iterasi berfungsi untuk mengurangi error yang terjadi (Pebriyanto 2016, Loke 2004).

# Validasi dan batasan

## Validasi

#  Untuk validasi, diperlihatkan dengan 4 kasus di laboratorium sebagai bagian dari pendidikan/pengajaran.

## Validasi untuk pendidikan Fisika Lingkungan (Wicking bed).

Sebuah kotak tanam berisi tanah, dengan tanaman capsicum. Dipindai dengan perangkat ini, kemudian diolah menggunakan RESINV2D untuk menampilkan gambaran di dalam tanah, menyangkut kandungan air dan posisi perakaran tanaman.

## Validasi teknik Non-Destructive Testing (Cavities Detection)

Dengan menggunakan dua lembar kertas konduktif berukuran sama dengan lembar pertama dalam keadaan utuh, dan kemudian lembar kedua dilubangi. Perangkat yang sama, dilakukan pemindaian sepanjang sisi yang sama. Data yang diperoleh dari kedua data pengukuran, diolah sehingga dihasilkan sebuah gambaran kertas utuh, dan terdeteksinya lubang pada lembar kertas kedua.

## Validasi phantom-agar USG

Sebuah blok phantom terbuat dari agar yang ditujukan untuk pengajaran USG di bidang ilmu kedokteran hewan, dengan perangkat yang sama digunakan untuk memindai pada bidang yang sama pada lintasan posisi scanner USG. Pemindaian dilakukan pada bagian sisi atas dan sisi bawah phantom, untuk mendapatkan ‘insight’ kemungkinan ERT sebagai cara fungsionalisasi objek berdasarkan nilai Resistiviasnya.

## Validasi kontaminasi benda asing dalam bahan pangan

Pada validasi terakhir, sebuah sosis dipindai pada sisi potongan datarnya, kemudian datanya diolah menggunakan RESINV2D, untuk kemungkinan menemukan benda asing yang terkandungnya.

## Batasan

Tidak direkomendasikan untuk uji menggunakan makhluk hidup, karena tidak dilengkapi dengan toleransi yang diujikan untuk keperluan tersebut.
Pengoperasian perangkat perlu kehati2an, mengingat titik kontak dapat menimbulkan pemanasan dan kemungkinan percikan api.

# Ucapan Terima Kasih

. Funded by

1. *Riset Kolaborasi Indonesia 2019: Pengembangan Tomografi Elektrik Sebagai 'Contrasting Agent' Magnetic Resonance Imaging*
2. *Riset Kolaborasi Indonesia 2020: Pengembangan Tomografi Hibrida : Electrical Impedance Tomography + Ultrasonography Dalam Bidang Biomedika*
3. *WCU-PRKK Institut Pertanian Bogor*

# Referensi

1. Harpenas, A, Dermawan, R., *Budi Daya Cabai Unggul.* PT Niaga Swadaya. Hal 9, 2010.
2. Herzog, M., Kanig, M., & Bubenzer, O., *Electrical resistivity tomography and forward modelling in hyper-arid environments–A case study from Erg Chebbi, Southeast Morocco*. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues, 62(1), 119-135, 2019.
3. Jiao-Jun, Z. H. U., Hong-Zhang, K. A. N. G., & Gonda, Y., *Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. Pedosphere,* 17(6), 801-812, 2007.
4. Jones, F., UBC Earth and Ocean Sciences.University of British Columbia. [diakses pada 12 April 2021] : *https://www.eoas.ubc.ca/ubcgif/iag/methods/meth\_1/measurements.htm,* 2007.
5. Loke, Meng Heng., *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.* Hal 29-31, 2004.
6. Pebriyanto Y., *Pengembangan metode pencitraan electrical resistivity tomography menggunakan konfigurasi Wenner β-Schlumberger: kasus anomali dalam bahan/material* [tesis].Bogor(ID): Institut Pertanian Bogor, 2016.
7. Ruan, W., Southey, R. D., Fortin, S., & Dawalibi, F. P., *Effective sounding depths for HVDC grounding electrode design: Wenner versus Schlumberger methods.* In 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific (pp. 1-7). IEEE, 2005.
8. Salehi, M., Ghods, P., & Isgor, O. B., *Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique.*Materials and Structures, 49(1-2), 301-316, 2016.
9. Seaton, W. J., & Burbey, T. J., *Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane.* Journal of Applied Geophysics, 51(1), 21-41, 2002.
10. Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., & Rai, J., *Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations.*Journal of Applied Geophysics, 67(1), 74-79, 2009.
11. Wijatmoko, B., Agustine, E., & Susanto, K., *Pemanfaatan Metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) untuk Mempertegas Posisi Polutan dan Air Bersih di Pusat Industri Kulit Garut*. Dharmanomaliya, 1(1), 2012.







