

Memahami Resistivitas berbagai Jenis Probe Arus-Tegangan

M. Toifur

Program Studi Fisika, FMIPA Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta
Alamat: Jl. Prof. Soepomo Janturan Umbulharjo Yogyakarta 55164
Email: mtoifur@yahoo.com

Abstrak – Penggunaan probe-probe arus-tegangan untuk menentukan resistivitas bahan telah dipakai secara luas pada berbagai bidang, dan pada berbagai ukuran sampel, namun masih sangat sedikit disampaikan sebagai bahan ajar bagi mahasiswa. Tulisan ini membahas secara teoretis resistivitas yang dihasilkan oleh berbagai jenis probe pada berbagai bentuk sampel. Di bagian akhir ditampilkan tabel resistivitas untuk berbagai jenis probe tersebut. Selain itu, sebagai contoh juga ditampilkan penggunaan probe Wenner pada bidang geologi. Diharapkan tulisan ini dapat bermanfaat sebagai bagian dari bahan ajar fisika.

Kata kunci: probe-probe arus- tegangan, resistivitas, probe Wenner

Abstract – The use of voltage-current probes for determining resistivity of material has been widely used in various field, and on various sample size, although it is still very little is conducted as teaching materials for students. This paper discusses theoretically resistivity resulted by various types of probes on various sample geometries. At the end discussion it is conducted the table of resistivity for that various probes. In addition, it is conducted as an example the use of Wenner probe in geology. It is wished that this paper can be useful as a part of physics teaching materials.

Keywords: Current-voltage probes, resistivity, Wenner probe

I. PENDAHULUAN

Pemahaman resistivitas bahan sangat penting karena resistivitas memberikan sumbangan pada beberapa parameter seperti resistansi, kapasitansi, tegangan ambang, dan lain-lain. Schroder pada bukunya *Semiconductor Material and Device Characterization* menempatkan pembahasan resistivitas pada bab I [1]. Tulisan lain yang membahas penentuan resistivitas bahan sudah cukup banyak namun sebagian besar baru sebagian-sebagian baik tipe probenya maupun tampang geometri sampel yang diprobe. Sebagai contoh Chan membahas penentuan resistivitas lapisan tipis dan bulk khusus untuk probe yang berada di permukaan bahan [2], sedangkan Valdes [3] telah menyampaikan persamaan resistivitas untuk bahan semikonduktor yang berbatasan dengan bahan konduktor dan non konduktor jika diperoleh menggunakan probe 4 titik sejajar dan tegak lurus bidang batas. Smits telah memberikan faktor koreksi terhadap resistivitas untuk sampel keping berbentuk empat persegi panjang jika panjang tidak sama dengan lebar untuk berbagai rasio antara lebar sampel terhadap jarak antar probe, dan untuk sampel yang berbentuk lingkaran untuk berbagai rasio antara diameter dan jarak antar probe. Sumbangan resistivitas berasal dari 3 sumber yaitu konduktivitas sampel, tebal lapisan, dan jarak antar probe yang dihitung secara komputasi [5]. Kekuatan kontak serta luas permukaan ujung probe yang kontak dengan lapisan juga sangat kuat memengaruhi hasil resistivitas lapisan [6] sehingga ditawarkan model penentuan resistivitas non kontak dengan memanfaatkan peralatan berbasis optik.

Penggunaan berbagai jenis probe di bidang geologi dapat menghasilkan data nilai-nilai resistivitas telah membantu menentukan jenis batuan di bawah permukaan tanah [7]. Hal ini disebabkan karena pola aliran arus

dapat menyebar sampai ke bagian dalam bahan. Jika daerah mengandung bahan-bahan sulfida, grafit, dan magnetit akan menghasilkan potensial lebih tinggi dibanding bahan-bahan lain. Untuk batuan yang mengandung porositas dan berisi cairan elektrolit maka untuk batuan dengan kadar porositas tinggi akan menghasilkan konduktivitas tinggi dan sebaliknya. Demikian pula nilai resistivitas dapat mengungkap tingkat korosi tanah [8]. Untuk bahan tipis adanya beda potensial antara dua tempat dapat mengindikasikan terjadinya korosi, seperti yang terjadi pada pipa yang terpendam dan kabel. Suhu juga dapat memengaruhi besar kecilnya beda potensial.

Topik mengenai probe-probe tegangan-arus ini penting mengingat jenisnya cukup bervariasi serta cakupan aplikasinya cukup luas mulai dari lapisan tipis sampai bahan bulk. Untuk mahasiswa geologi penggunaan probe-probe tegangan-arus sudah biasa khususnya tipe probe seperti tipe Wenner, Wenner-Schlumberger dan dipole-dipole, demikian pula mahasiswa fisika yang mengkhususkan mendalami fisika material sudah mengenal khususnya probe 4 titik untuk menentukan resistivitas keping lapisan tipis. Namun untuk mahasiswa S1 dan S2 pendidikan fisika materi tersebut raltif belum dikenalkan.

Oleh karena itu Schuetze dkk. peduli terhadap hal ini untuk dimasukkan ke bahan ajar topik elektrostatik, disertai dengan eksperimen probe 4 titik melalui modifikasi modul eksperimen elektrostatik. Dengan probe 4 titik, mahasiswa diajak untuk memahami variasi nilai resistansi R terhadap jarak antar probe setelah terlebih dulu dipahamkan konsep dasar elektromagnet seperti prinsip superposisi, potensial listrik, hukum Ohm [9].

II. LANDASAN TEORI

A. Beda Potensial pada Probe Tegangan

Perambatan arus dalam bahan ada 3 macam cara yaitu secara elektronik, secara elektrolit dan secara dielektrik. Yang berperan untuk jenis pertama adalah elektron bebas seperti pada logam, yang kedua adalah ion-ion, sedangkan yang ketiga adalah kadar pembawa muatan (*carrier*) sehingga melalui besar kecilnya polarisasi listrik dapat ditentukan jenis bahan apakah insulator atau konduktor. Konduktivitas dielektrik ditentukan oleh nilai permitivitasnya (tetapan dielektrik, *k*). Besaran-besaran yang menyertai penentuan tetapan dielektrik di antaranya adalah polarisasi, kuat medan listrik, susceptibilitas listrik, dan pergeseran listrik [10].

Jika arus listrik dialirkan melalui probe maka arus yang memancar dari ujung probe merambat pada arah radial. Jika arusnya homogen stabil serta bahan yang dialiri arus isotropik maka bidang ekuipotensialnya berbentuk permukaan bola. Potensial pada suatu titik untuk sebaran arus ke arah radial dalam sistem koordinat bola diperoleh dengan menyelesaikan persamaan Laplace pada keadaan tunak.

Operator Laplasian dalam koordinat bola

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

Untuk potensial listrik *V* hanya tergantung arah radial saja maka

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \quad (2)$$

dan

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0. \quad (3)$$

Dengan mengalikan dengan *r*² dan mengintegrasikannya maka diperoleh penyelesaian umum berbentuk [7]:

$$V = -\frac{C}{r} + D \quad (4)$$

Dengan *C* dan *D* konstanta. Dengan memasukkan syarat batas yaitu untuk *r* → ∞, *V* = 0 maka *D* = 0 sehingga

$$V = -\frac{C}{r}. \quad (5)$$

Untuk berbagai jenis konfigurasi probe persamaan (5) tetap ditaati, hanya nilai konstanta *C* yang berbeda-beda. Hubungan antara rapat arus dan medan listrik dinyatakan dalam ungkapan

$$J = \sigma E. \quad (6)$$

Dengan *J* rapat arus, *σ* konduktivitas bahan, dan *E* medan listrik. Dengan *E* = -*dV*/*dr*, dan *σ* = 1/*ρ* dengan *ρ* resistivitas bahan maka

$$dV = -\rho J dr. \quad (7)$$

Dengan menggantikan *J* = *I*/*A* dengan *A* luas penampang yang diliri arus listrik

$$dV = -\rho \frac{I}{A} dr. \quad (8)$$

Pada bagian berikut ditampilkan berbagai konfigurasi probe serta berbagai variasi penempatan probe tersebut pada bahan untuk memperoleh nilai resistivitas bahan. Untuk bahan bulk kemungkinan besar tidak isotropik sehingga jika pengukuran resistivitas dilakukan di

permukaan maka arus akan melalui beberapa lapis bahan sehingga resistivitas yang diperoleh bukan resistivitas untuk satu jenis bahan namun untuk beberapa jenis bahan. Resistivitas demikian dikenal dengan resistivitas semu. Persamaan (8) digunakan sebagai dasar dari pembahasan penentuan resistivitas tersebut.

B. Probe 1 Titik di Kedalaman Bahan Bulk

Probe 1 titik (Gambar 1) sebenarnya terdiri dari 2 probe di mana satu probe ditempatkan di kedalaman tertentu dan probe yang lain ditempatkan pada tempat yang cukup jauh sehingga arus yang berasal dari probe dalam tidak sampai mengalir ke tempat tersebut.

Untuk probe yang dipasang di kedalaman bahan, sebaran arus listrik membentuk luas penampang berbentuk bola sehingga *A* = 4*πr*². Dengan memasukkan *A* ke persamaan (8)

$$dV = -\rho I \frac{dr}{4\pi r^2}. \quad (9)$$

Dengan mengintegrasikan (9) pada batas ∞ sampai *r* diperoleh

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r}. \quad (10)$$

Dengan mengukur tegangan *V* dan arus listrik *I* maka resistivitas bahan,

$$\rho = 4\pi r \frac{V}{I}. \quad (11)$$

C. Probe 1 Titik di Permukaan Bahan Bulk

Untuk probe 1 titik di permukaan (Gambar 2) maka luas penampang yang dilalui arus listrik setengah bola, sehingga luasan *A* = 2*πr*². Selanjutnya dengan memasukkan nilai *A* ini pada persamaan (8), maka diperoleh

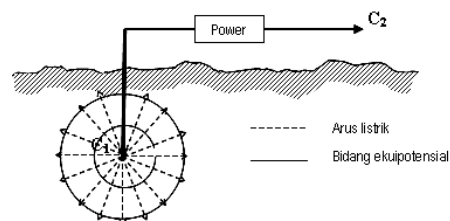
$$dV = -\rho I \frac{dr}{2\pi r^2}. \quad (12)$$

Dengan mengintegrasikan (10) maka diperoleh

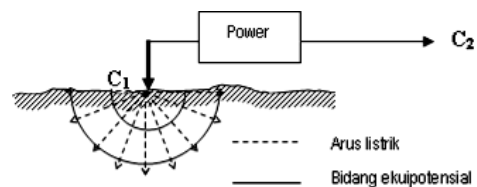
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (13)$$

Resistivitas bahan jika diukur dipermukaan menghasilkan

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I}. \quad (14)$$

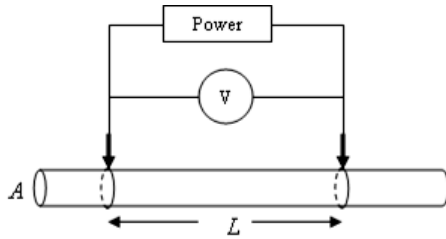


Gambar 1. Probe 1 titik di kedalaman.



Gambar 2. Probe 1 titik di permukaan.

D. Probe 2 Titik di Kawat Penghantar



Gambar 3. Probe 2 titik pada kawat penghantar.

Probe 2 titik (Gambar 3) biasanya digunakan untuk mengukur tahanan yang terbuat dari bahan keramik, tahanan konduktor yang berbentuk kawat, dan tahanan lain yang memiliki dua ujung kawat. Bentuk sampel harus disiapkan baik panjang maupun luas penampangnya apakah berbentuk silinder, balok, atau kubus. Kontak elektrode dibuat sebaik mungkin yaitu dari bahan yang memiliki konduktivitas tinggi serta ujungnya runcing untuk mengurangi hambatan yang timbul akibat ketidaklancaran aliran arus listrik pada titik kontak.

Pada kasus ini arus listrik mengalir ke satu arah yaitu mengikuti konduktor sehingga potensial. Perbedaan dengan probe 1 titik probe kedua memiliki jarak yang dekat dengan probe pertama sehingga aliran arus masih sampai ke probe kedua.

Dari persamaan (8) karena luas penampang aliran arus tidak berubah terhadap jarak ke probe pertama \$x\$ yaitu \$A\$, maka

$$dV = -\frac{\rho I}{A} dx \tag{15}$$

Untuk panjang kawat penghantar dengan panjang \$L\$, maka dengan mengintegrasikan (15) pada batas integrasi [0:\$L\$] diperoleh

$$V = -\frac{\rho I}{A} L \tag{16}$$

Sehingga resistivitas kawat penghantar tersebut

$$\rho = \frac{A V}{L I} \tag{17}$$

Dengan \$A\$ luas penampang dan \$L\$ = panjang kawat.

E. Probe 2 Titik di Kedalaman Bahan Bulk

Metode ini merupakan metode paling sederhana untuk mengukur resistivitas bahan. Pada konfigurasi ini dua probe arus dan tegangan menjadi satu. Karena probe arus dan tegangan menjadi satu (Gambar 4) maka ada kemungkinan tahanan yang terukur bukan hanya tahanan bahan namun juga tahanan dari probe. Metode ini cukup baik dipakai jika tahanan bahan jauh lebih besar dibandingkan dengan tahanan probe.

Luasan permukaan bahan yang dialiri arus listrik adalah \$A=4\pi r^2\$, sehingga dengan merujuk ke persamaan (8), beda potensial pada jarak \$r\$ dari \$C_1\$ oleh sumber arus pada \$C_1\$,

$$V_{C_1} = -\rho I \int \frac{dr}{4\pi r^2} = \frac{\rho I}{4\pi r} \tag{18}$$

Dengan cara yang sama untuk probe arus \$C_2\$ yang dialiri arus \$-I\$, maka pada jarak \$r\$ akan diperoleh beda potensial

$$V_{C_2} = -\rho(-I) \int \frac{dr}{4\pi r^2} = -\frac{\rho I}{4\pi r} \tag{19}$$

Beda potensial antara titik \$C_1\$ dan titik \$C_2\$ yang berjarak \$s\$ yang disebabkan oleh sumber arus \$I\$ pada \$C_1\$ adalah

$$V_{C_1} = \frac{\rho I}{4\pi s} \tag{20}$$

Dengan cara yang sama untuk sumber arus negatif (\$-I\$) pada probe \$C_2\$ maka beda potensial antara \$C_1\$ dan \$C_2\$ yang berjarak \$s\$ adalah

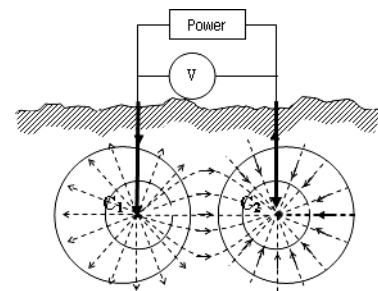
$$V_{C_2} = -\frac{\rho I}{4\pi s} \tag{21}$$

Karena \$V_{C_2} = -V_{C_1}\$ maka beda potensial total antara \$C_1\$ dan \$C_2\$ adalah:

$$V = V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{\rho I}{2\pi s} \tag{22}$$

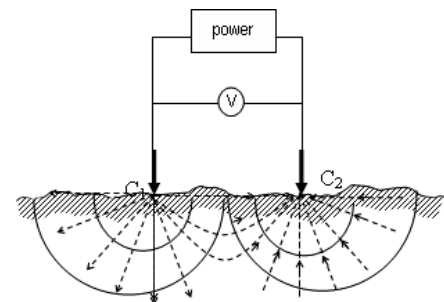
sehingga resistivitas bahan yang diukur dengan model ini

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \tag{23}$$



Gambar 4. Probe 2 titik di kedalaman bahan bulk.

F. Probe 2 Titik di Permukaan Bahan Bulk



Gambar 5. Probe 2 titik di permukaan bahan bulk.

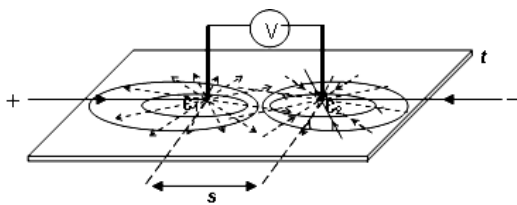
Untuk menentukan beda potensial antara \$C_1\$ dan \$C_2\$ (Gambar 5) prinsipnya sama dengan pada probe 2 titik di bagian kedalaman bahan bulk, hanya saja untuk probe yang ditempatkan di bagian permukaan bahan ini luas permukaan bahan yang dialiri arus listrik separoh permukaan bola sehingga beda potensial antara kedua probe dua kali beda potensial dua probe yang dipasang di kedalaman bahan. Beda potensial total antara \$C_1\$ dan \$C_2\$ adalah:

$$V = V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{\rho I}{\pi s} \tag{24}$$

Sehingga resistivitas bahan yang diukur dengan model ini

$$\rho = \pi s \frac{V}{I} \tag{25}$$

G. Probe 2 Titik pada Permukaan Pelat



Gambar 6. Probe 2 titik di permukaan pelat konduktor.

Pada probe 2 titik di permukaan (Gambar 6) arus listrik menjalar di permukaan pada arah radial sehingga membentuk permukaan lingkaran dan pada kedalaman setebal lapisan tipis sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 6. Dengan mendefinisikan luas bahan yang dialiri arus listrik $A = 2\pi r t$ dengan t tebal lapisan maka persamaan (8) menjadi:

$$dV = -\rho I \frac{dr}{2\pi r t} \quad (26)$$

Beda potensial antara 2 titik diperoleh dengan mengintegrasikan (26) pada batas dari x_{C1} ke x_{C2} , sehingga diperoleh:

$$V = -\rho I \int_{x_{C1}}^{x_{C2}} \frac{dr}{2\pi r t} = -\frac{\rho I}{2\pi t} \left(\ln \frac{x_2}{x_1} \right) \quad (27)$$

Beda potensial antara C_1 dan C_2 dengan batas integrasi dari x_{C1} ke x_{C2} dari sumber arus positif pada C_1 dengan mengikuti cara pengungkapan Wangness [11]:

$$V_{C1} = -\frac{\rho I}{2\pi t} \left(\ln \frac{x_{C2}}{x_{C1}} \right) \quad (28)$$

Ungkapan seperti ini lebih dipilih jika jarak antar probenya dekat. Sebagai contoh jika $x_{C2} = x_{C1}$ atau probe C_2 menyatu dengan probe C_1 , maka sesuai dengan realitas beda potensial antara kedua probe nol karena $\ln(1) = 0$.

Dengan cara sama untuk sumber arus negatif di C_2 , maka beda potensial antara C_1 dan C_2 adalah:

$$V_{C2} = \frac{\rho I}{2\pi t} \left(\ln \frac{x_{C1}}{x_{C2}} \right) \quad (29)$$

Beda potensial total antara C_1 dan C_2 adalah

$$V = V_{C1} + V_{C2} = \frac{\rho I}{\pi t} \left(\ln \frac{x_{C1}}{x_{C2}} \right) \quad (30)$$

Karena tebal lapisan hanya beberapa atom sampai ratusan atom maka sulit mengukur ketebalan sehingga didefinisikan besaran resistivitas keping (*sheet resistivity*),

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} \quad (31)$$

Dengan (31) maka dari (30) dengan mengambil nilai positifnya diperoleh,

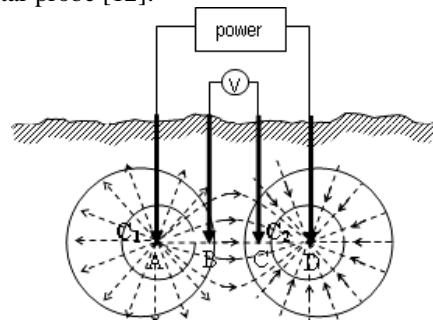
$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln \left(\frac{x_{C2}}{x_{C1}} \right)} \frac{V}{I} \quad (32)$$

H. Probe 4 Titik di Kedalaman Bahan Bulk

Probe 4 titik banyak dipilih untuk penentuan resistivitas bahan karena hasilnya sangat akurat. Adanya dua probe yang mengukur tegangan aman dari aliran arus listrik sehingga tahanan yang terukur merupakan murni tahanan bahan, tidak tercampur tahanan tambahan dari probe luar. Probe luar dapat menyumbang tahanan karena panas yang timbul akibat aliran arus listrik dapat menyumbang tahanan.

Metode probe 4 titik seperti ini juga sering disebut metode Kelvin jika probe diganti dengan kawat penghantar. Metode Kelvin dapat digunakan untuk mengukur resistansi bahan yang nilainya dari yang sangat kecil sampai yang sangat besar, bahkan sampai jutaan ampere. Untuk arus yang sangat besar digunakan tahanan yang sangat kecil (orde mili Ohm).

Ada beberapa varian probe 4 titik diantaranya Wenner alpha, Wenner beta, Wenner gamma, pole-pole, pole-dipole, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger, dan equatorial dipole-dipole. Varian tersebut merupakan kombinasi hasil pengaturan posisi probe, serta pengaturan jarak antar probe [12].



Gambar 7. Probe 4 titik di kedalaman bahan.

Jika pada probe 2 titik posisi probe arus dan tegangan menyatu, maka pada probe 4 titik posisi keduanya dibedakan. Probe arus merupakan probe bagian luar (A dan D) sedangkan probe tegangan merupakan probe bagian dalam (B dan C) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Bentuk persamaan tegangan antara titik B dan C oleh sumber arus di A sama dengan yang telah diperoleh pada pers. (18) hanya batas integrasi diubah dari titik B ke titik C. Jika jarak antara A dan B adalah x_{AB} , dan jarak antara titik A dan titik C adalah x_{AC} maka untuk sumber arus positif di A beda potensial antara titik B dan C adalah

$$V_{BC+} = -\rho I \int_{x_{AB}}^{x_{AC}} \frac{dr}{4\pi r^2} = -\frac{\rho I}{4\pi} \int_{x_{AB}}^{x_{AC}} \frac{dr}{r^2} \\ = -\frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{r} \right]_{x_{AB}}^{x_{AC}} = -\frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{x_{AC}} - \frac{1}{x_{AB}} \right] \quad (33)$$

Sedangkan untuk beda potensial antara titik B dan C akibat aliran arus dari sumber arus negatif di titik C, batas integrasi diukur dari titik D. Jika jarak dari B ke D adalah x_{BD} dan jarak dari titik C ke D adalah x_{CD} maka

$$V_{BC-} = -\rho(-I) \int_{x_{BD}}^{x_{CD}} \frac{dr}{4\pi r^2} = \frac{\rho I}{4\pi} \int_{x_{BD}}^{x_{CD}} \frac{dr}{r^2}$$

$$= \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{r} \right]_{x_{BD}}^{x_{CD}} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{x_{CD}} - \frac{1}{x_{BD}} \right]. \quad (34)$$

Beda potensial total antara titik B dan C adalah

$$V_{BC} = V_{BC_+} + V_{BC_-} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{x_{AB}} - \frac{1}{x_{AC}} + \frac{1}{x_{CD}} - \frac{1}{x_{BD}} \right]. \quad (35)$$

Jika jarak antar probe adalah s beda potensial total antara titik B dan C adalah

$$V_{BC} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} + \frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right] = \frac{\rho I}{4\pi s}. \quad (36)$$

Dengan demikian maka resistivitas bahan

$$\rho = 4\pi s \frac{V_{BC}}{I}. \quad (37)$$

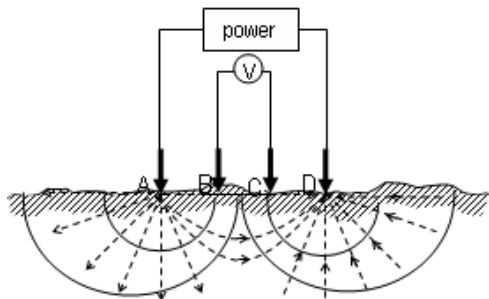
I. Probe 4 Titik di Permukaan Bahan Bulk

Pada prinsipnya sama dengan probe 4 titik di bagian dalam bahan, hanya saja arus merambat membentuk permukaan setengah bola sehingga beda potensial antara titik B dan C separoh beda potensial probe 4 titik di kedalaman bahan (Gambar 8). Maka,

$$V_{BC} = \frac{\rho I}{2\pi s}. \quad (38)$$

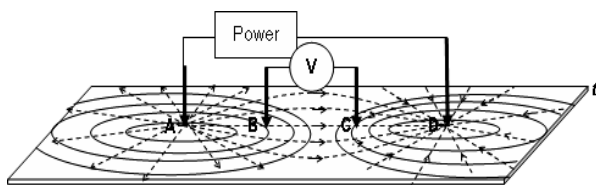
Sedangkan dari (35) resistivitas bahan menjadi

$$\rho = 2\pi s \frac{V_{BC}}{I}. \quad (39)$$



Gambar 8. Probe 4 titik di permukaan bahan.

J. Probe 4 Titik pada Permukaan Plat



Gambar 9. Probe 4 titik pada permukaan pelat.

Penentuan resistivitas pada probe 4 titik yang dipasang pada permukaan pelat mirip dengan probe 2 titik di permukaan pelat (Gambar 9). Jika jarak antara titik A dan B adalah x_{AB} sedangkan jarak dari titik A ke C adalah x_{AC} , maka dari (26) dengan mengambil batas integrasi dari x_{AB} ke x_{AC} beda potensial antara titik B dan C dari sumber arus positif di titik A,

$$V_{BC_+} = -\rho I \int_{x_{AB}}^{x_{AC}} \frac{dr}{2\pi r t} = -\frac{\rho I}{2\pi t} \left[\ln x_{AC} - \ln x_{AB} \right]. \quad (40)$$

Sedangkan beda potensial antara titik B dan C dari sumber arus negatif di titik D dimana jarak dari titik B ke D adalah x_{BD} sedangkan jarak dari titik C ke D adalah x_{CD} ,

$$V_{BC_-} = -\rho(-I) \int_{x_{BD}}^{x_{CD}} \frac{dr}{2\pi r t} = \frac{\rho I}{2\pi t} \left[\ln x_{CD} - \ln x_{BD} \right]. \quad (41)$$

beda potensial total antara titik B dan C diperoleh dengan menjumlahkan persamaan (40) dan (41),

$$V_{BC} = V_{BC_+} + V_{BC_-} = -\frac{\rho I}{2\pi t} \ln \left(\frac{x_{AC} \times x_{BD}}{x_{AB} \times x_{CD}} \right) \quad (42)$$

Jika jarak antar probe seragam yaitu s maka $x_{AB} = x_{CD} = s$ dan $x_{AC} = x_{BD} = 2s$ sehingga

$$V_{BC} = -\frac{\rho I}{\pi t} \ln 2. \quad (43)$$

Dengan demikian maka besarnya resistivitas keping dengan metode seperti ini

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V_{BC}}{I}. \quad (44)$$

Dari pembahasan berbagai jenis probe arus-tegangan serta bahan yang diprobe maka dapat diungkapkan secara sederhana sebagaimana pada Tabel 1.

Tabel 1. Berbagai jenis probe arus-tegangan serta bahan yang diprobe

No	Jenis Probe yang digunakan	Persamaan untuk resistivitas
1	Probe 1 titik di kedalaman bahan bulk	$\rho = 4\pi r \frac{V}{I}$
2	Probe 1 titik di permukaan bahan bulk	$\rho = 2\pi r \frac{V}{I}$
3	Probe 2 titik di kawat penghantar	$\rho = \frac{A V}{L I}$
4	Probe 2 titik di kedalaman bahan bulk	$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}$
5	Probe 2 titik di permukaan bulk	$\rho = \pi s \frac{V}{I}$
6	Probe 2 titik di permukaan pelat	$\rho_s = \frac{\pi}{\ln \left(\frac{x_{C_2}}{x_{C_1}} \right)} \frac{V}{I}$
7	Probe 4 titik di kedalaman bahan bulk	$\rho = 4\pi s \frac{V_{BC}}{I}$
8	Probe 4 titik di permukaan bahan bulk	$\rho = 2\pi s \frac{V_{BC}}{I}$
9	Probe 4 titik di permukaan plat	$\rho_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V_{BC}}{I}$

Keterangan:

- V = beda potensial
- L = panjang kawat
- r = jarak
- I = arus listrik
- ρ = resistivitas
- s = jarak antar kaki probe
- ρ_s = resistivitas keping
- t = tebal lapisan
- A = luas penampang

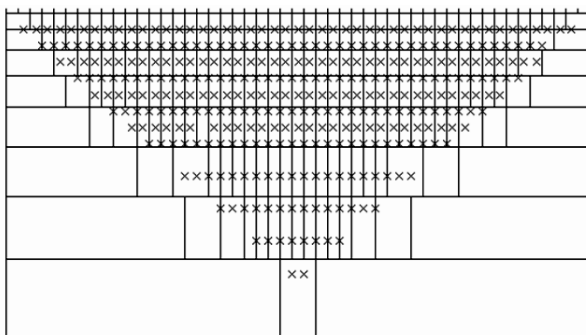
K. Pemakaian Probe 4 Titik pada Bidang Geologi

Pada bidang geologi pengukuran resistivitas di permukaan dikaitkan dengan resistivitas bawah

permukaan. Variasi nilai resistivitas terkait dengan beberapa parameter batuan seperti kandungan mineral, kandungan cairan, porositas, banyaknya air yang terkandung pada batuan [12].

Batuan ada tiga jenis yaitu batuan beku, batuan sedimen, dan batuan metamorf. Batuan yang memiliki resistivitas dari $10^{-6} \Omega m$ sampai $1 \Omega m$ termasuk konduktor yang baik, resistivitas dari $1 \Omega m$ sampai $10^7 \Omega m$ termasuk konduktor yang buruk, sedangkan resistivitas lebih dari $10^7 \Omega m$ termasuk isolator. Untuk tanah resistivitas terkait dengan kandungan air serta kadar ion garam [8]. Semakin kecil nilai resistivitas semakin tinggi korosifitasnya.

Pada penentuan resistivitas lapisan bawah permukaan dengan mengikuti konfigurasi Wenner secara prinsip sebagaimana pada probe 4 titik, namun jumlah probe dapat dipasang sampai banyak (misalnya 22 probe) pada jarak tertentu (misalnya $a = 0,5 m$). Peralatan pokok yang dibutuhkan terdiri dari resistivimeter, *accu*, elektroda dan kabel sebagai penghubung antar elektroda dengan Resistivimeter. Pada tahap pertama empat probe yaitu probe pertama, kedua, ketiga sampai keempat yang masing-masing berjarak a difungsikan sebagai probe arus dan tegangan. Selanjutnya yang difungsikan sebagai probe arus-tegangan adalah probe kedua, ketiga, keempat dan kelima. Demikian dan seterusnya sampai probe terakhir. Dengan keadaan ini maka arus listrik mampu menjangkau lapisan pada kedalaman $2a$. Pada tahap kedua jarak antar probe dibuat $2a$, sehingga arus listrik mampu menjangkau sampai kedalaman $2a$. Pada tahap ketiga jarak antar probe dibuat $3a$ dan seterusnya. Jika ada 22 probe maka arus listrik mampu menjangkau hingga kedalaman 19,8 m. Setelah itu nilai resistivitas terukur dapat diplot dalam format blok seperti Gambar 10 dengan ukuran dapat dipilih dalam satuan jarak antar elektroda yang ditancapkan di permukaan tanah, atau menggunakan model lain sehingga ukuran blok separoh dari ukuran standar.



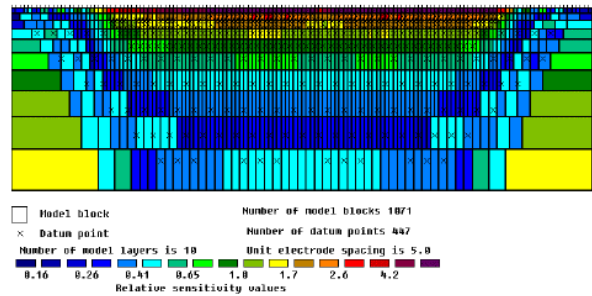
Gambar 10. Penggambaran nilai resistivitas dalam format blok.

Selanjutnya masing-masing kotak diberi warna (lihat Gambar 11) sesuai dengan rentang nilai resistivitasnya secara tepat dan teliti (nilai kepekaan relatif), sebagaimana keterangan pada bagian bawah gambar.

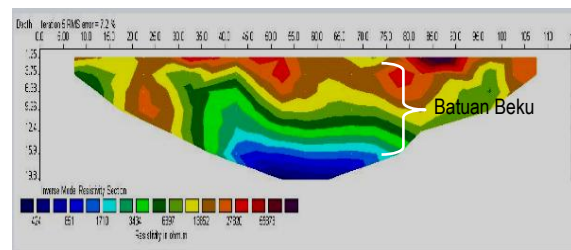
Dapat pula dilakukan inversi dengan menggunakan *software* *res2dinv* sehingga diperoleh tampilan citra seperti pada Gambar 12. Gambar 12 adalah contoh hasil pengukuran lintasan geolistrik di Kelurahan Tarau 1

dilakukan dengan arah N320W (Hamid, 2014). Bagian kiri gambar terdapat skala yang menunjukkan kedalaman lapisan tanah.

Model 2D hasil inversi inilah yang dipakai sebagai dasar untuk melakukan interpretasi. Dengan tampilan citra resistivitas seperti itu maka dapat disimpulkan kondisi batuan bawah permukaan. Pada gambar untuk kedalaman hingga $\pm 16 m$ nilai resistivitas antara $1710 \Omega m - 55873 \Omega m$, sehingga lapisannya merupakan lapisan batuan beku. Pada kedalaman $\pm 20 m$ nilai resistivitas menurun antara $424 \Omega m - 151 \Omega m$ yang menunjukkan bahwa batuan sudah berbatasan dengan tanah.



Gambar 11. Citra blok resistivitas bahan pada berbagai tempat dan berbagai lapisan.



Gambar 12. Citra inversi resistivitas bahan pada berbagai tempat dan berbagai lapisan

III. KESIMPULAN

Dari pemaparan yang telah disampaikan di atas maka dapat disimpulkan:

1. Telah dihasilkan formulasi beberapa nilai resistivitas untuk berbagai tipe probe dan tampang geometri bahan.
2. Materi resistivitas berbagai jenis probe arus-tegangan penting untuk dipahami oleh tenaga kependidikan fisika (mahasiswa pendidikan fisika dan guru fisika) mengingat penerapannya sangat luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Drs. Ishafit, M.Si. yang telah dengan baik bersedia menjadi teman diskusi khususnya yang menyangkut masalah kependidikan sehingga terwujud makalah ini.

PUSTAKA

[1] D. K. Schoder, 1990. *Semiconductor Material and Device Characterization*, Wiley, New York.
 [2] J. Chan, 1994. Four-Point-Probes modify by Friedberg, P., 2002, *EECS Microfabrication Technology*, dalam

- http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/fa10/lab/four_point_probe.pdf, diunduh tanggal 12 Maret 2014.
- [3] L. B. Valdes, 1954. Resistivity measurements on Germanium for Transistors, *Proceedings of The I-R-E*, 42, Feb., 1954, p.420.
- [4] F. M. Smits, 1958. Measurement of Sheet Resistivity with The Four-Point Probe, *The Bell System Technical Journal*, p. 711-718.
- [5] A. Kalavagunta, R. A. Weller, 2005. Accurate Geometry Factor Estimation for the Four Point Probe Method using COMSOL Multiphysics, *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference*, Boston.
- [6] D. H. Petersen, R. Lin, T. M. Hansen, E. Rosseel, W. Vandervorst, C. Markvardsen, D. Kjær, and P. F. Nielsen, 2008. Comparative Study Of Size Dependent Four-Point Probe Sheet Resistance Measurement On Laser Annealed Ultra-Shallow Junctions, *J. Vac. Sci. Technol. B* 26, 362.
- [7] W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff, 1990. *Applied Geophysics*, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, New York.
- [8] P. Roberge, 2006. *Corrosion Basic: An Introduction*, 2nd ed. Nace Press Book, Houston Texas.
- [9] A. P. Schuetze, W. Lewis, C. Brown, and W. J. Geerts, 2004. A Laboratory on The Four-Point Probe Technique, *Am. J. Phys.* 72 (2), p. 149-153.
- [10] Anonim. 2014. *Section 4: Electrical Resistivity Surveying*, dalam http://www.ukm.my/rahim/resistivity_lecture.htm, diunduh pada tanggal 02 April 2014.
- [11] R. K. Wangness, 1976. *Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons, New York.
- [12] M. H. Looke, 1999. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, A Practical Guide to 2-D and 3-D surveys*, Penang, Malaysia.
- [13] F. Hamid, 2014. Penerapan Metode Geolistrik Tahanan Jenis Untuk Menentukan Struktur Bawah Permukaan Daerah Tumpahan Lava Beku Gunung Gamalama, *Tesis*, Pascasarjana UAD.