

Rancang Bangun Catu Daya dengan Sumber Arus Konstan untuk Geolistrik Resistivitas Meter

Gusti Rana Fahlevi Sudenasahaq, Drs. Hasto Sunarno, M.Sc., dan Drs. Bachtera Indarto, M.Si
 Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: bachtera@physics.its.ac.id

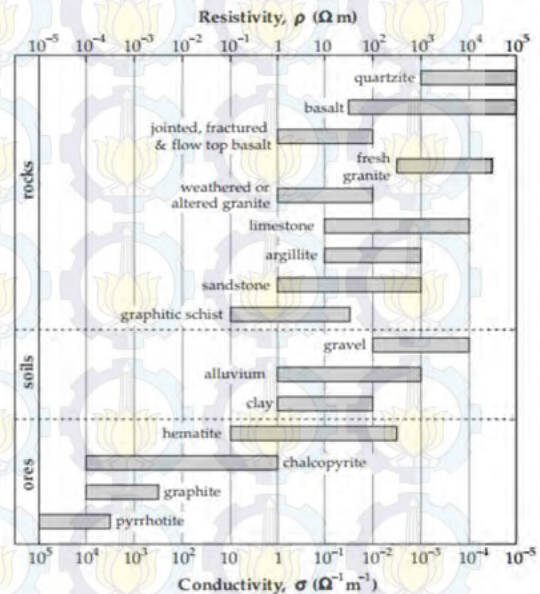
Abstrak— Implementasi sumber arus konstan pada rancang bangun catu daya untuk pengukuran geolistrik resistivitas meter telah berhasil dibuat dan dianalisa. Sistem pengukuran geolistrik resistivitas meter dilengkapi terdiri dari rangkaian boost converter, sumber arus konstan, dan mikrokontroler sebagai sistem kendali proses pengukuran dan akuisisi data geolistrik resistivitas meter berupa data resistansi. Sistem akuisisi data menggunakan hukum Ohm dan jenis metode geolistrik yang digunakan adalah Metode Wenner. Pada penelitian ini, sumber arus konstan yang berhasil diimplementasikan pada sistem geolistrik resistivitas meter yakni sebesar 0,1mA bekerja pada resistansi 0,4Ω sampai 2,345MΩ dan arus 1mA bekerja pada resistansi resistansi 0,4Ω hingga 8,53kΩ. Serta pada pengukuran resistansi dapat terukur dengan baik pada pengukuran resistansi 33Ω hingga 470kΩ.

Kata Kunci— Boost Konverter, Geolistrik-resistivitas, mikrokontroler, dan Sumber Arus.

I. PENDAHULUAN

BUMI tersusun atas kerak benua dan kerak samudera. Kerak benua tersusun atas beberapa lapisan yang terdiri atas beberapa batuan penyusun dengan karakteristik yang bervariasi. Untuk mengetahui jenis batuan penyusun pada lapisan kerak bumi dapat diketahui dari resistivitas batuan tersebut. Tahanan jenis (resistivitas) merupakan salah satu sifat batuan yang menunjukkan kemampuan batuan tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu batuan maka semakin sulit batuan tersebut menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya [1].

Tahanan jenis atau resistivitas adalah kemampuan suatu bahan untuk menahan arus listrik yang direpresentasikan dengan ρ (rho) dalam sebuah persamaan matematik. Materi yang kita jumpai sehari-hari merupakan kumpulan sejumlah besar atom atau molekul. Molekul terdiri atas atom-atom, sedangkan atom-atom itu sendiri terdiri dari inti yang bermuatan positif yang dikelilingi oleh awan elektron yang bermuatan negatif. Batuan merupakan suatu jenis materi sehingga batuan mempunyai sifat-sifat kelistrikan [2].



Gambar 1 Data Nilai Resistivitas Batuan [2].

Menurut Reynolds (1997), konduktivitas atau lebih dikenal dengan sebutan Daya Hantar Listrik (DHL) adalah suatu besaran yang menunjukkan banyaknya ion-ion terlarut dalam air yang dapat menghantarkan arus listrik sebesar 1μvolt pada bidang lapisan metal seluas 1 cm. Sifat ini dipengaruhi oleh jumlah kandungan yang disebut sebagai ion bebas. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Bumi terdiri dari lapisan-lapisan bebatuan dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda, sehingga potensial yang terukur dipengaruhi oleh lapisan-lapisan tersebut dan menyebabkan nilai tahanan jenis yang terukur tergantung pada jarak elektroda. Nilai tahanan jenis yang terukur bukanlah tahanan jenis yang sebenarnya melainkan tahanan jenis semu (ρ_a).

$$\rho = RA/L \tag{1}$$

$$R = \frac{\Delta V}{I} \tag{2}$$

dengan:

ρ = Resistivitas (Ωm),

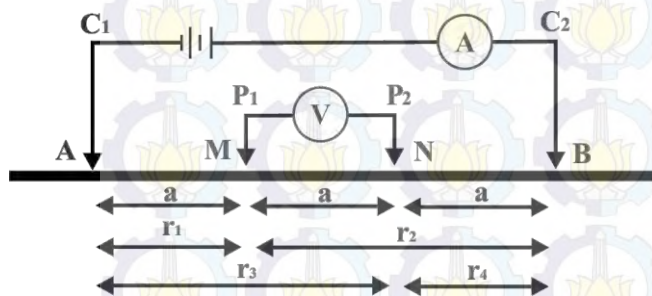
R = Resistansi (Ω),

I = Arus Listrik (A),
 L = Panjang Lintasan (m),
 ΔV = Tegangan (V).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui sifat resistivitas batuan yaitu metode geolistrik resistivitas. Rujukan [3] menjelaskan Metode geolistrik resistivitas merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan sifat resistivitas tanah atau batuan untuk mempelajari keadaan bawah permukaan bumi. Prinsip kerja geolistrik adalah mengukur resistivitas dengan mengalirkan arus listrik kedalam lapisan bawah tanah melalui elektroda arus. Kemudian arus diterima oleh elektroda potensial dengan menganggap bumi sebagai resistor. Metode geolistrik resistivitas menggunakan prinsip hukum Ohm dimana hambatan suatu bahan berbanding terbalik dengan nilai arus yang mengalir dan berbanding lurus dengan beda potensial. Hambatan suatu bahan dipengaruhi oleh hambatan jenis, panjang hambatan dan luas hambatan.

Rujukan [3] menjelaskan, metode geolistrik resistivitas merupakan metode geolistrik yang mempelajari sifat resistivitas listrik dari lapisan batuan di dalam bumi. Pada metode ini arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua buah elektroda arus dan dilakukan pengukuran beda potensial melalui dua buah elektroda potensial. Dari hasil pengukuran arus dan beda potensial listrik maka dapat dihitung variasi harga resistivitas pada lapisan permukaan bumi di bawah titik ukur (*Sounding point*). Pada metode geolistrik dikenal banyak konfigurasi elektroda, diantaranya yang sering digunakan adalah konfigurasi *Wenner*, konfigurasi *Schlumberger*, konfigurasi dipol-dipol dan lain-lain.

Pada penulisan ini metode pengukuran resistivitas tanah dengan menggunakan metode konfigurasi *Wenner*. Metode ini diperkenalkan oleh Wenner (1915). Konfigurasi *Wenner* merupakan salah satu konfigurasi yang sering digunakan dalam eksplorasi geolistrik dengan susunan jarak spasi sama panjang ($r_1 = r_4 = a$ dan $r_2 = r_3 = 2a$). Jarak antara elektroda arus (C_1 dan C_2) adalah tiga kali jarak elektroda potensial, jarak potensial dengan titik *sounding*-nya adalah $a/2$, maka jarak masing-masing elektroda arus dengan titik *sounding*-nya adalah $3a/2$.



Gambar 2 Elektroda Arus dan Potensial pada Konfigurasi *Wenner*

Target kedalaman yang mampu dicapai pada metode ini adalah $a/2$. Konfigurasi *Wenner* jarak antara elektroda arus dan elektroda potensial adalah sama ($AM = NB = a$ dan jarak $AN = MB = 2a$) seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Rujukan [4] menjelaskan bahwa pengukuran resistivitas secara umum dilakukan dengan menginjeksikan arus listrik ke

dalam bumi dengan menggunakan dua elektroda arus (C_1 dan C_2), dan pengukuran beda potensial dengan menggunakan dua elektroda tegangan (P_1 dan P_2). Dari data harga arus (I) dan beda potensial (V), dapat dihitung nilai resistivitas semu (ρ_a) seperti pada persamaan 3.

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \tag{3}$$

Dengan:

ρ_a = resistivitas semu (Ωm),

k = faktor geometri yang bergantung pada penempatan elektroda.

Sedangkan untuk mencari faktor geometri konfigurasi *Wenner* dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$k_w = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \tag{4}$$

Dengan:

k_w = faktor geometri konfigurasi *Wenner*

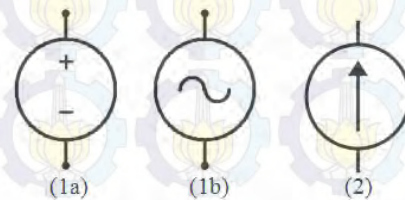
dengan $AM = MN = NB = a$. Sehingga faktor geometri untuk konfigurasi *Wenner* adalah:

$$k_w = 2\pi a \tag{5}$$

$$\rho_w = k_w R \tag{6}$$

dengan R adalah besar nilai hambatan yang terukur.

Sebuah sumber tegangan ideal adalah elemen sirkuit yang mempertahankan tegangan output tanpa memperhatikan arus beban. Demikian pula, sumber arus ideal adalah elemen sirkuit yang mempertahankan arus yang ditentukan tanpa memperhatikan tegangan keluaran [5].



Gambar 3 Sumber Tegangan DC (1a), AC (1b), dan Sumber Arus(2)

Sumber arus merupakan sumber yang menyediakan arus konstan tanpa dipengaruhi variasi resistansi beban. Sumber arus dapat dibuat dari kombinasi dioda, transistor (BJT dan Mosfet), dan Op-Amp [6].

Konverter DC-DC berlaku seperti halnya *trafo/transformer* yang mengubah tegangan AC tertentu ke tegangan AC yang lebih tinggi atau lebih rendah. Tidak ada peningkatan ataupun pengurangan daya masukan selama pengkonversian bentuk energi listriknya, sehingga secara ideal persamaan dayanya dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses} \tag{7}$$

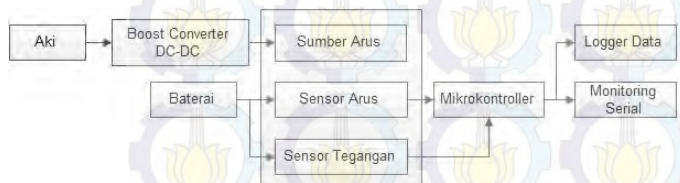
Konverter DC-DC dapat dibagi menjadi 2 kategori besar, yaitu yang terisolasi dan yang tak terisolasi. Kata 'isolasi' disini secara sederhana bermakna adanya penggunaan trafo (isolasi galvanis) antara tegangan masukan dan tegangan

keluaran konverter DC-DC. Beberapa sumber menyebutkan bahwa konverter DC-DC yang tak terisolasi dengan istilah *direct converter*, dan konverter yang terisolasi dengan istilah *indirect converter*. Konverter boost berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan masukannya, atau biasa disebut dengan konverter penaik tegangan. Konverter ini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga surya dan turbin angin. Pada penelitian ini, penulis membuat rangkaian *boost converter* dari rangkaian inverter dan rangkaian *rectifier*. Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC tetap menjadi sumber tegangan AC dengan frekuensi tertentu. Rectifier adalah alat yang digunakan untuk mengubah sumber arus bolak-balik (AC) menjadi sinyal sumber arus searah (DC).

II. METODE

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir terdiri dari Atmega 328p, Inverter DC to AC, Rectifier AC to DC, Baterai 12V-7Ah, LCD 16x2, Kabel, PakuKonektor, Batu bata, PCB, Resistor keramik, Baterai Lead Acid 12V 7,2 Ah, Accu 12V 32Ah, Multimeter, Powersupply DC.

Sistem perangkat keras (hardware) terdiri dari 7 bagian rangkaian meliputi rangkaian Boost Converter, rangkaian sumber arus konstan, rangkaian sensor tegangan, rangkaian sensor arus, rangkaian pembalik arah dan rangkaian kontroler sebagai pengukur dan menyimpan data. Sistem perangkat lunak (software) terdiri dari perancangan program dengan menggunakan software Arduino yang digunakan untuk pengolahan hasil pengukuran potensial dan arus serta monitoring hasil resistansi (Ω) dari pengukuran.



Gambar 4 Diagram Blok Sistem

A. Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Pada subbab ini akan dijelaskan tentang perancangan dan implementasi perangkat keras (hardware) meliputi perancangan rangkaian Boost Converter, perancangan rangkaian sumber arus konstan, perancangan rangkaian sensor tegangan, perancangan rangkaian sensor arus, perancangan rangkaian pembalik arah dan perancangan rangkaian kontroler sebagai pengukur dan penyimpan data.

B. Perancangan Boost Converter DC – DC

Pada pengukuran resistansi dibutuhkan sumber arus yang nantinya akan ditransmisikan pada suatu resistor. Tegangan yang bersumber dari accu perlu dinaikkan agar nilai resistansi yang terhitung dari hasil pengukuran yang didapatkan bernilai besar. Pada penelitian ini menggunakan inverter sebagai penguat tegangan sehingga didapatkan keluaran tegangan AC 220V dan kemudian dijadikan menjadi arus DC dengan

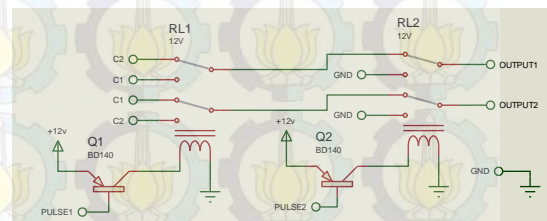
menggunakan rangkaian *rectifier* sehingga didapatkan tegangan 250VDC.

C. Perancangan Sumber Arus Konstan

Pada penelitian ini menggunakan sumber arus konstan sebagai sumber arus injeksi, sehingga menjaga arus yang dialirkan tetap konstan tanpa memperhatikan tegangan yang terukur. Rangkaian sumber arus konstan terdiri dari transistor bipolar (npn), opamp dan resistor. Transistor yang digunakan yaitu MJE13005 dan Op-Amp tipe lm358. Penentuan besarnya arus dibagi menjadi 2 bagian yakni konstan 1mA dan 0,1mA.

D. Perancangan Pembalik Arah

Perancangan pengubah arah arus injeksi dirancang seperti pada gambar berikut:

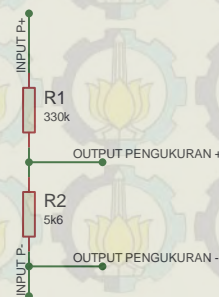


Gambar 5 Rangkaian Pembalik Arus Injeksi

Sistem perancangan dibentuk untuk pembuatan titik bidang potensial listrik yang sama besar nilainya, pembalikan arah arus listrik digunakan untuk membandingkan hasil pengukuran potensial pada arah yang berbeda dari proses depolarisasi. Hal ini juga digunakan untuk mendapatkan perpotongan potensial saat diaplikasikan untuk pengukuran resistansi tanah. Pengukuran potensial menyesuaikan arah aliran arus, artinya pengukuran potensial positif ditempatkan pada arus positif begitu juga dengan sebaliknya.

E. Perancangan Sensor Tegangan

Untuk mengetahui tegangan sumber dan tegangan baterai maka dibutuhkan sensor tegangan. Pada penelitian ini menggunakan sensor tegangan dengan prinsip dasar pembagi tegangan (*voltage divider*). Sensor tegangan terdiri dari dua resistor yang dirangkai seri dan tegangan referensi diperoleh di titik pencabangan resistor. Hasil tegangan referensi akan dihubungkan ke Arduino UNO sebagai mikrokontroler untuk mengukur dan memonitoring tegangan secara *real time*. Rangkaian sensor tegangan adalah sebagai berikut:



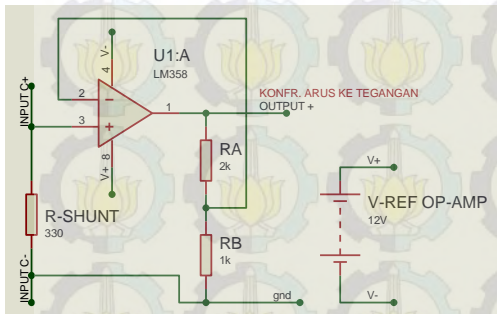
Gambar 6 Perancangan Sensor Tegangan

Pengukuran potensial 1 disambungkan pada input P positif dan pengukuran potensial 2 disambungkan pada input P negatif. Hasil keluaran sinyal atau output pengukuran positif disambungkan pada ADC mikrokontroler sedangkan titik

terendah pengukuran atau output pengukuran negatif disambungkan pada *ground* mikrokontroler.

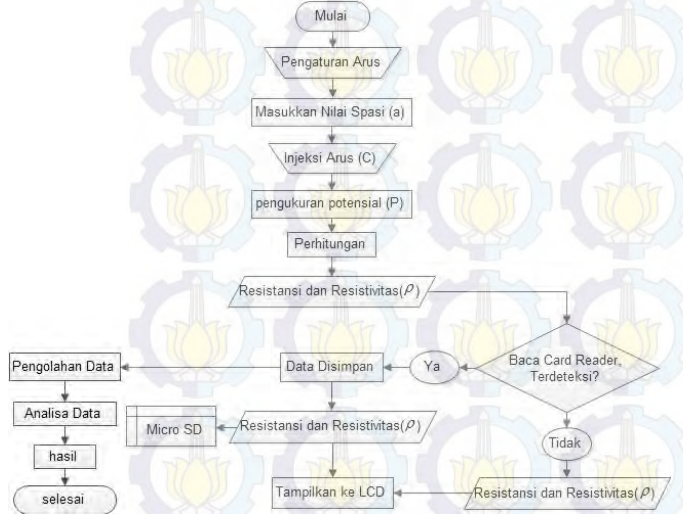
F. Perancangan Sensor Arus

Pada saat kondisi penginjeksian arus pada resistor, arus merupakan parameter penting karena arus yang akan dialirkan harus tetap konstan sehingga nilai resistansi dapat terukur. Pada penelitian ini, *Output* sensor arus berupa tegangan sehingga akan dihubungkan langsung ke mikrokontroler. Berikut ini adalah gambar rangkaian sensor arus.



Gambar 7 Perancangan Sensor Arus

Sensor arus dipasang secara seri terhadap resistor. Arus input positif disambungkan pada input positif dan arus input negatif disambungkan pada input negatif. Tegangan referensi yang digunakan Op-Amp sebesar 12VDC dengan baterai sebagai sumber tegangannya. Hasil konversi arus ke tegangan akan diolah dengan menggunakan ADC mikrokontroler.



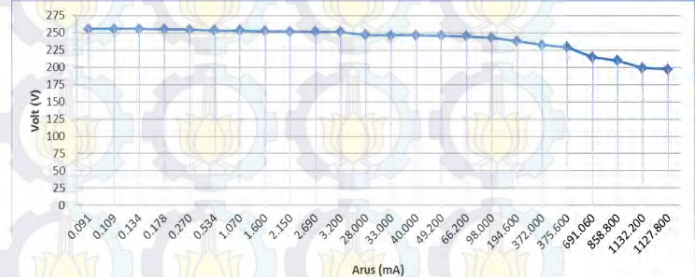
Gambar 8 Skema Sistem Kerja Prototipe Resistivitas Meter

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Karakteristik Boost Converter

Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembebanan *Boost Converter* dengan mengukur tegangan keluaran dan arus beban yang diberikan. Pada pengujian ini pembebanan menggunakan resistor. Pengujian karakteristik *Boost Converter* meliputi pengukuran tegangan open circuit (V_{oc}) atau pengukuran tanpa beban yang dilakukan langsung menggunakan voltmeter dan selanjutnya pengukuran dengan beban data yang diambil adalah data tegangan beban yang

dipasang paralel dan pengukuran arus beban yang disambungkan secara seri terhadap beban. Tegangan *Boost Converter* menggunakan aki 12V/32Ah, berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan tegangan dasar atau tegangan open circuit adalah 255VDC. Adapun hasil pengujian karakteristik *Boost Converter* dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 4.1.

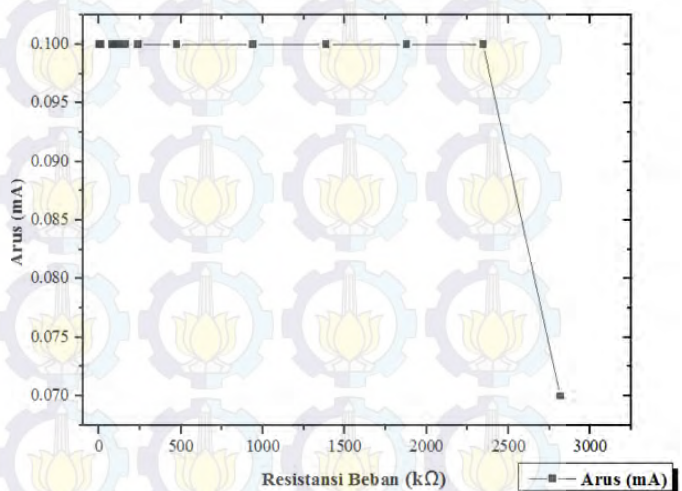


Gambar 9 Perancangan Sensor Arus

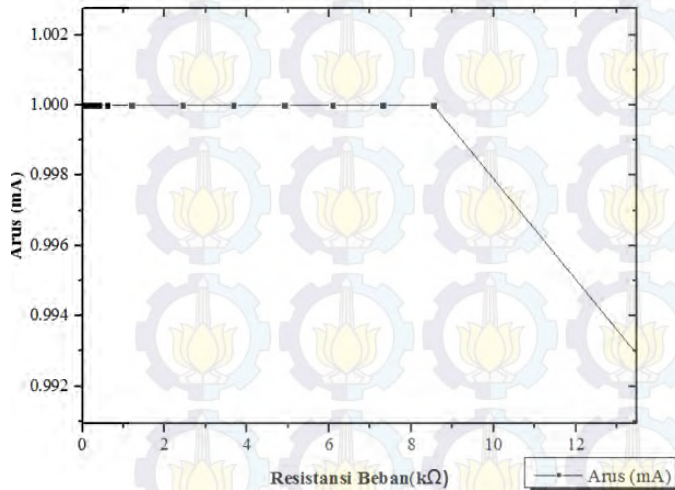
B. Pengujian karakteristik Sumber Arus

Nilai resistansi didapatkan dari perhitungan pengukuran tegangan dan arus. Penulis menggunakan sumber arus di mana arus yang di alirkan pada beban akan dijaga konstan. Namun, untuk mendapatkan arus yang konstan tidak luput dari huku kekekalan energi di mana daya input sama dengan daya output ditambah dengan daya yang terbuang. Pada pengujian sumber arus ini digunakan uji pembebanan dengan menggunakan resistor dari resistansi 0,4Ω hingga 2,817MΩ. Pengujian ini dibuat konstan menjadi dua bagian 0,1mA dan 1mA.

Dari hasil karakterisasi Sumber arus konstan 0,1mA seperti Gambar 4.2. Pada pengukuran sumber arus konstan 0,1mA pembebanan dimulai pada resistansi 0,4Ω dan tetap konstan hingga resistansi 2,345MΩ. Daya beban yang terpakai melebihi daya minimum input oleh karena itu arus tak dapat konstan lebih dari 2,345MΩ.



Gambar 10 Grafik hasil uji Sumber arus konstan 0,1 mA

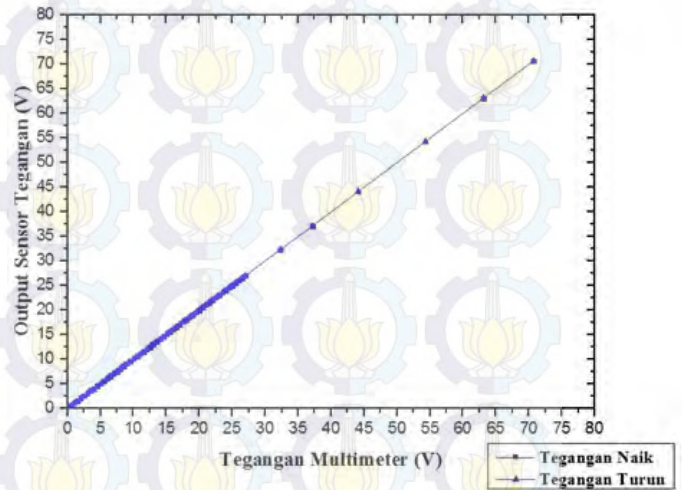


Gambar 11 Grafik hasil uji Sumber arus konstan 1 mA

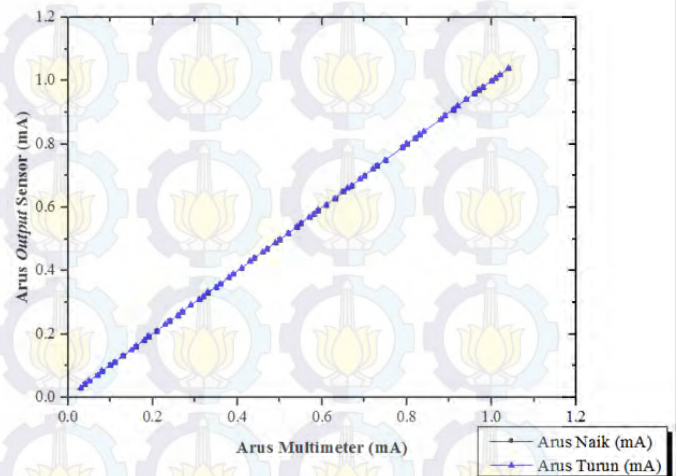
Berdasarkan hukum ohm, ketika tegangan sumber tegangan adalah 255VDC dengan injeksi arus yang mengalir pada rangkaian tertutup adalah 0,1mA atau sama dengan 0,0001A maka hambatan maksimum yang dapat terukur adalah 2,550MΩ hal ini terukur pada keadaan ideal namun pada kenyataannya masi terdapat daya yang hilang akibat panas maupun dari hambatan kabel. Oleh karena itu pada karakterisasi sumber arus konstan tidak dapat mempertahankan arus konstan pada hambatan 2,817MΩ. Dari gambar 4.2 dapat disimpulkan bahwa arus konstan 0,1mA dapat dapat dapat digunakan untuk mengukur hambatan pada range 0,4Ω hingga 2,345MΩ. Sedangkan pada pengukuran arus konstan 1mA, yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. dari gambar tersebut arus konstan berhenti pada pembebanan. berdasarka karakteristik ini dapat disimpulkan bahwa dapat digunakan sebagai pengukuran hingga resistansi 0,4Ω hingga 8,3kΩ.

C. Pengujian Karakteristik Sensor Tegangan

Sensor tegangan digunakan untuk mengukur tegangan pada beban. Sensor tegangan yang diimplementasikan menggunakan prinsip pembagi tegangan (voltage divider) yang terdiri dari dua resistor dirangkai seri sehingga diperoleh tegangan referensi pada titik percabangan resistor. Tegangan referensi sensor menggunakan tegangan batas mikrokontroler yakni maksimal pada tegangan +5VDC. Tegangan yang terukur berupa sinyal analog akan dikonversikan ke bentuk biner. Mikrokontroler yang digunakan menggunakan 10bit yang nilai pegukuran yang diterima diubah ke nilai digital yang maksimum 1023.



Gambar 12 Hasil pengujian Histerisis Sensor Tegangan

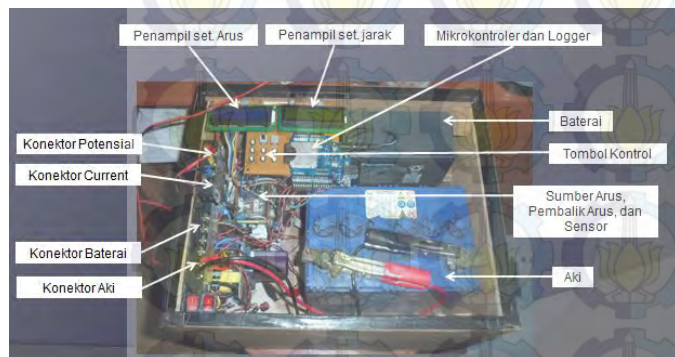


Gambar 13 Hasil Pengujian karakterisasi sensor Arus

Arus listrik yang dialirkan pada beban harus dijaga konstan salah satu tujuannya memperkecil variabel pengukuran. Untuk memonitoring arus konstan pada rangkaian sumber arus. Pada gambar 4.7 merupakan hasil kalibrasi sensor arus dengan menggunakan amperemeter. Pengukuran kalibrasi dilakukan padapengujian arus 0,03mA hingga 1,04mA. pada saat kalibrasi sensor tidak dapat mengukur pada arus. Hal ini terjadi karena perubahan variasi tegangan menggunakan power supply analog yang sulit untuk diset pada batas pengukuran arus tersebut, sehingga pada batas pengukuran arus 0,75mA hingga 0,79mA tidak dapat ditampilkan. Namun, pada dasarnya nilai pengukuran yang dihasilkan sama dengan yang terukur menggunakan amperemeter. Hasil pengukuran yang dihasilkan pada amperemeter tidak dapat terukur pada ketelitian tiga angka dibelakang koma, sedangkan pengukuran ketelitian pada mikro dapat terukur hingga tiga angka di belakang koma, sehingga data arus dari perbandingan pengukuran menggunakan amperemeter dan sensor arus yang didapatkan mendekati kesamaan pada ketelitian dua angka di belakang koma.

Pada Gambar 4.10 merupakan hasil uji banding pengukuran resistansi resistor dengan menggunakan prototipe danalat tigre resistivity meter untuk pengujian batas resistansi 0,4Ω hingga

470k Ω . Pengujian ini dilakukan tiga kali pengulangan pengambilan data resistansi resistor dimana pada masing-masing pengukuran dihitung simpangannya. Acuan pengukuran terletak pada data perhitungan resistansi, di mana perhitungan ini didapatkan dari pengukuran arus dan tegangan pada resistor sehingga didapatkan nilai resistansi resistor yang sebenarnya. Dari data di atas pada prototipe mengalami simpangan pada pengukuran resistansi 0,47 Ω dan 3,9 Ω . Hal ini dapat terjadi karena penurunan kemampuan ukur untuk pengukuran sensor tegangan sehingga ketelitian sensor berkurang pada pengukuran tegangan yang rendah. Karakteristik untuk pengukuran mikro yang dapat terukur adalah $\pm 4,8$ mV/bit yang didapatkan dari 5 Volt/1023, di mana 5 volt merupakan tegangan referensi dan 0 hingga 1023 skala desimal untuk 10 bit ($2^{10}-1$). Dari tegangan pengukuran yang rendah dalam skala milivolt mengakibatkan sensor tegangan tidak dapat bekerja secara maksimal atau keakuratannya menurun. Sehingga dari hasil pengujian yang didapatkan prototipe dapat bekerja dengan baik pada pengukuran resistansi 33 Ω hingga 470k Ω .



Gambar 14 Prototipe Sistem Pengukuran Geolistrik Resistivitas Meter dengan Menggunakan Sumber Arus Konstan.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa implementasi sumber arus konstan pada rancang bangun catu daya untuk pengukuran geolistrik resistivitas meter berhasil dilakukan. Pada sistem pengukuran didapatkan karakteristik untuk sumber arus konstan 0.1mA dapat bekerja pada batas resistansi 0,4 Ω hingga 2,345M Ω dan arus konstan 1mA dapat bekerja pada batas resistansi 0,4 Ω hingga 8,53k Ω . pada pengukuran resistansi dapat terukur dengan baik pada pengukuran resistansi 33 Ω hingga 470k Ω .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT dengan Rahmat dan Karunia-Nya sehingga dapat memperlancarkan segala urusan, serta kepada dosen Pembimbing Bpk. Drs. Bachtera Indarto, M.Si, dan Bpk. Drs. Hasto Sunarno, M.Sc. yang telah membimbing dalam penelitian Tugas Akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Grandis, Hendra. 2006. Diktat Kuliah Geo-Elektromagnet. Departemen Geofisika, FIKTM, Institut Teknologi

Bandung, Bandung.

- [2] Ward, S. H., (1990), Resistivity and induced polarization methods: in Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1, Ward, S. H., ed: Soc. of Expl. Geophys.
- [3] Hendrajaya, L dan Idam, A. 1990. Geolistrik Tahanan Jenis. Laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika FMIPA ITB. Bandung.
- [4] Milsom, J., 2003, Field Geophysics, The Geological Field Guide Series 3rd Edition, John Wiley & Sons, West Sussex
- [5] Nilson, James W. dan Riedel, Susan A., (2008), Electric Circuits Eighth Edition, New Jersey: Pearson Education. Inc.
- [6] Harrison, L.T., 2005. Current Sources and Voltage References: A Design Reference for Electronics Engineers. Newnes