

TTGO LORA ESP32: SOLUSI NIRKABEL UNTUK PROTOTIPE PENGENDALIAN PENGINJEKSI ARUS PADA METODE GEOLISTRIK

Sifa Nurpadillah¹, Kusnahadi Susanto², Husneni Mukhtar³, Willy Anugrah Cahyadi⁴, Akhmad Fauzi Ikhsan⁵, Agung Ihwan Nurdin⁶, Taufiq Abdul Razzak⁷, Dien Rahmawati⁸

^{1, 5, 6, 7} Teknik Elektro, Universitas Garut, Indonesia

² Geofisika, Universitas Padjadjaran, Indonesia

^{3, 4, 8} School of Electrical Engineering, Telkom University, Indonesia

¹sifa.nurpadillah@uniga.ac.id

Diterima pada 11 November 2023; disetujui pada 29 November 2023; dan diterbitkan pada 31 Januari 2023.

Abstrak

Sifat resistivitas batuan yang diperoleh pada metode geolistrik digunakan untuk memperkirakan struktur bawah permukaan tanah dan jenis batuan pada eksplorasi geofisika. Proses pengumpulan data pada metode geolistrik ini seringkali dilakukan pada daerah terpencil dengan memasang elektrode arus (AB) dan elektrode potensial (MN) hingga mencapai 1,5 km. Keberhasilan eksplorasi sangat bergantung pada sumber injeksi arus yang digunakan. Semakin besar arus yang digunakan, maka semakin dalam eksplorasi yang dapat dilakukan. Namun demikian, jarak antar elektrode AB dan MN yang dibutuhkan menjadi semakin jauh dan pemasangan elektrode ABMN tersebut dihubungkan dengan kabel. Hal tersebut mengakibatkan proses pengumpulan data pada jarak elektrode yang semakin jauh pun menjadi semakin kompleks. Studi ini, membahas prototipe sumber arus untuk metode geolistrik yang dapat berkomunikasi secara nirkabel dengan bantuan TTGO LoRa ESP32 sebagai pengendali. Prototipe ini memberikan tiga pemilihan *power* injeksi, yakni *full power*, *middle power*, dan *low power*. Penginjeksian arus dilakukan pada *dummy resistor* yang bertindak sebagai bumi. Pada saat penginjeksian arus pada *dummy resistor*, diperoleh pengukuran arus menggunakan sensor INA219 yang memberikan hasil pengukuran yang sangat konsisten karena mempunyai *relative error* < 1% (pada *dummy resistor* 50 Ω dan 300 Ω). Lain halnya pada saat penginjeksian arus pada *dummy resistor* 2 k Ω , terukur arus 0,0066 A, *relative error* naik menjadi 1,5%. Namun hal tersebut masih menunjukkan konsistensi yang baik dari hasil pengukuran INA219. Selain itu, *Mean Average Percentage Error* (MAPE) untuk semua pengukuran berada pada rentang < 10%, yang artinya pembacaan INA219 memberikan hasil yang sangat baik.

Kata Kunci: geolistrik, INA219, pembagi tegangan, penginjeksi arus, TTGO LoRa.

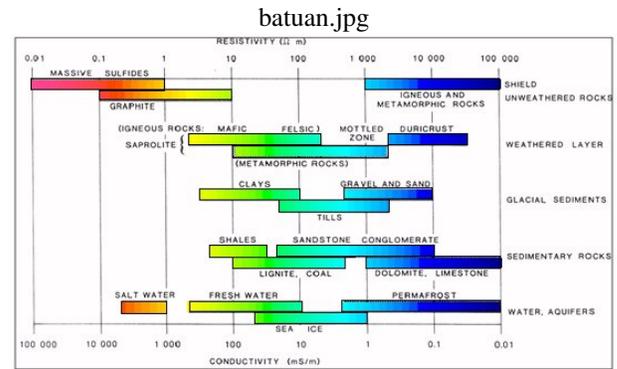
Abstract

Rock resistivity properties obtained using the geo-electric method are used to estimate subsurface soil structures and rock types in geophysical exploration. The data collection process using this geoelectrical method is often carried out in remote areas by installing current electrodes (AB) and potential electrodes (MN) up to 1.5 km away. The success of exploration is highly dependent on the current injection source used. The greater the current used, the deeper exploration that can be carried out. However, the required distance between AB and MN electrodes is getting further and the ABMN electrodes are connected by a cable. This causes the process of collecting data at further distances of electrodes to become more complex. This study discusses a current source prototype for geo-electric methods that can communicate wirelessly with TTGO LoRa ESP32 as a controller. This prototype provides three injection power options: full, medium, and low. Current injection is carried out on a dummy resistor, which acts as earth. When injecting current into the dummy resistor, current measurements obtained using the INA219 sensor gave very consistent measurement results because it had a relative error of < 1% (on 50 Ω and 300 Ω dummy resistors). When measuring a current of 0.0066 A, the relative error increases to 1.5%. But it still shows good consistency in the INA219 measurement results. In addition, the MAPE for all measurements is within < 10%, which means that the INA219 readings provide excellent results.

Key Words: current injector, geo-electrical, INA219, voltage divider, TTGO LoRa.

1. Pendahuluan

Geofisika merupakan ilmu yang mempelajari bagian-bagian bumi yang tidak dapat terlihat langsung dari permukaan. Metode geofisika mempelajari tentang bumi melalui pengukuran sifat fisiknya, dengan bantuan matematika dan komputasi, serta peralatan yang tersedia dan dilakukan di atas permukaan bumi. Geofisika juga mencakup interpretasi pengukuran yang dilakukan untuk mendapatkan informasi yang berguna tentang struktur dan komposisi di dalam bumi [?]. Struktur dan komposisi di dalam bumi tersebut dapat diperkirakan melalui beberapa sifat fisis batuan, seperti kelistrikan, kemagnetan, elastisitas, dan densitas. Metode geolistrik merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan sifat aliran listrik di dalam bumi. Metode geolistrik ini memanfaatkan arus yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektrode arus dan mengukur beda potensial melalui dua elektrode potensial di permukaan bumi. Hasil pengukuran arus dan beda potensial di permukaan tersebut kemudian diturunkan menjadi variasi nilai resistivitas pada masing-masing lapisan batuan di bawah titik ukur [?]. Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan instrumen pengukuran geolistrik. Penelitian [?, ?, ?, ?, ?] merancang empat buah elektrode yang terhubung menggunakan kabel ke main unit yang kemudian diproses dengan mikrokontroler. Pada penelitian tersebut, mikrokontroler digunakan untuk menentukan nilai resistivitas berdasarkan nilai arus yang diinjeksikan ke bumi dan tegangan yang terukur di permukaan. Elektrode arus AB dan elektrode potensial MN dihubungkan menggunakan kabel ke suatu main unit yang sama. Pada metode geolistrik, interpretasi struktur bawah permukaan yang lebih dalam diperoleh dengan membuat jarak elektrode antara AB dan MN semakin jauh. Oleh karena itu, proses pengumpulan data akan menjadi lebih kompleks, yakni proses persiapan yang cukup lama, dan dapat meningkatkan biaya proses eksplorasi karena dibutuhkan porter yang lebih banyak untuk membawa kabel. Selain itu, dalam satu kali penginjeksian arus, maka diperoleh satu datum sehingga, untuk mendapatkan profil bawah permukaan diperlukan konfigurasi yang berbeda untuk posisi elektrode ABMN. Tentu saja hal tersebut akan membuat proses pengumpulan data menjadi lebih lama lagi. Kemudian, berikutnya terdapat penelitian terkait perancangan resistivity meter multiprobe dengan interkoneksi setiap elektrode menggunakan kabel [?, ?, ?]. Terdapat perkembangan yang signifikan pada penelitian tersebut, yakni dalam satu kali penginjeksian arus maka dapat diperoleh profil bawah permukaan. Hal tersebut dikarenakan penggunaan banyak probe yang dapat secara bergantian menjadi elektrode arus atau elektrode potensial. Pengaturan konfigurasi pengukuran dilakukan menggunakan switch box. Akan tetapi, seluruh elektrode masih terhubung dengan kabel yang



Gambar 1. Rentang resistivitas batuan dan mineral [?].

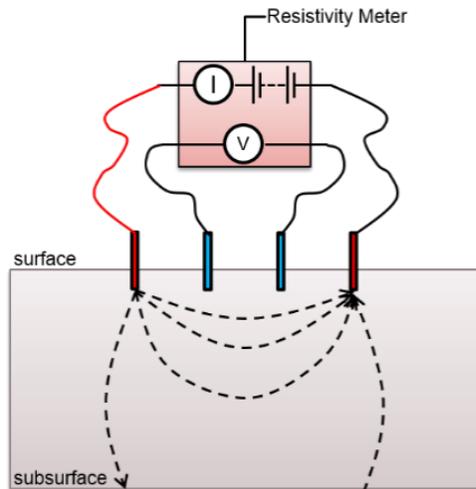
sama ke main unit. Penggunaan kabel dalam pengukuran geolistrik resistivitas di lapangan dinilai menghabiskan banyak waktu dan biaya dalam proses pengumpulan data.

Proses pengukuran pada metode geolistrik, yang seringkali dilakukan di remote area, mungkin dapat diatasi dengan menerapkan teknologi komunikasi LoRa. Dalam hal ini, pengumpulan data dari setiap elektrode potensial MN ke control unit (yang terintegrasi dengan elektrode arus AB) dapat dilakukan secara nirkabel melalui teknologi komunikasi LoRa. Teknologi LoRa telah digunakan pula untuk memudahkan transfer data pengukuran arus induksi geomagnetik di lapangan atau daerah terpencil [?]. Pada penelitian tersebut dilakukan penambahan modul LoRa SX1278 pada mikrokontrolernya. Penelitian berikutnya, teknologi LoRa digunakan pada sistem pemantauan lahan *smart farming* menggunakan TTGO LoRa ESP32 [?]. TTGO LoRa ESP32 merupakan mikrokontroler yang terintegrasi LoRa. Pada penelitian ini, modul TTGO LoRa ESP32 digunakan sebagai alat bantu instrumen geolistrik *resistivity meter*. Dalam perancangannya, geolistrik *resistivity meter* terdiri dari blok penginjeksi arus dan pengukur tegangan. Pada penelitian ini dibuat *prototyping* blok penginjeksi arus dengan bantuan TTGO LoRa ESP32 sebagai pengendalinya. Keberhasilan dari perancangan ini dapat digunakan untuk penelitian berikutnya pada skala lapangan. Dalam hal ini, penginjeksi arus dapat berkomunikasi dengan pengukur tegangan yang dapat terpisah dengan jarak hingga 1,5 km.

2. Landasan Teori

2.1 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik resistivitas merupakan metode geofisika aktif yang bertujuan untuk mengetahui sifat kelistrikan lapisan batuan. Prosedur utama dari metode ini adalah melakukan injeksi arus ke dalam bumi dan melakukan pengukuran potensial di atas permukaan



Gambar 2. Langkah dasar metode resistivitas geolistrik.

bumi. Kedua prosedur tersebut dilakukan dengan menggunakan dua elektrode sebagai alat bantu pada masing-masing prosedur. Metode geolistrik resistivitas ini dilakukan untuk mendapatkan nilai resistivitas formasi batuan bawah permukaan. Nilai resistivitas untuk beberapa mineral dan batuan ditunjukkan pada Gambar ???. Resistivitas jenis batuan pada berbagai komposisi mineral di bumi mempunyai kisaran nilai resistivitas tertentu. Nilai resistivitas tergantung pada komposisi mineral batuan, kondisi batuan, komposisi zat cair dalam batuan, dan faktor eksternal tertentu [?]. Oleh karena itu jika profil/penampang nilai resistivitas diketahui, maka hal tersebut berasosiasi dengan struktur batuan di bawah permukaan.

2.2 Prinsip Pengukuran Geolistrik Resistivity Meter

Gambar ??? menampilkan prinsip pengukuran geolistrik *resistivity meter* yang mengacu pada Hukum Ohm, $V = I \times R$, dengan cara menginjeksikan arus listrik (I) ke dalam tanah melalui sepasang elektrode arus, dan mengukur beda potensial (V) yang timbul melalui sepasang elektrode potensial pada jarak tertentu dari elektrode arus. Tanah/bumi sebagai media penghantar mempunyai hambatan R . Berdasarkan hasil pengukuran arus (I) dan potensial (V) untuk setiap jarak elektrode yang berbeda, dapat digunakan untuk menentukan variasi nilai resistivitas di bawah titik ukur [?]. Arus diinjeksikan ke dalam tanah melalui elektrode arus, dan perbedaan tegangan yang dihasilkan diukur dengan elektrode potensial [?].

Asumsi umum yang digunakan pada metode geolistrik resistivitas adalah bumi sebagai medium homogen isotropis. Namun pada kenyataannya, bumi sebagai media tidak homogen mempunyai nilai resistivitas yang berbeda untuk setiap lapisannya

sehingga resistivitas yang terukur adalah resistivitas semu.

Resistansi suatu batuan hasil pengukuran dapat ditulis sebagai persamaan (??), dengan R adalah resistansi, V potensial, dan I arus yang diinjeksikan.

$$R = \frac{V}{I} \tag{1}$$

Hubungan antara resistansi material R dan resistivitas material ρ ditunjukkan pada persamaan (??), dengan l adalah panjang benda, dan A adalah luas penampang.

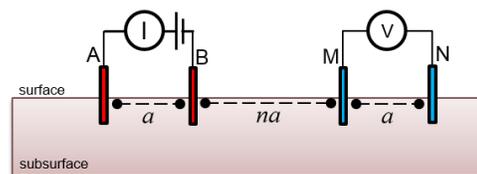
$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2}$$

Resistivitas semu suatu batuan dapat diperoleh dari persamaan (??). Pada metode geolistrik, resistivitas semu mengacu pada nilai resistivitas yang dihitung dari pengukuran arus listrik dan tegangan di permukaan tanah. Oleh karena itu, resistivitas semu dapat dihitung dengan menggunakan Hukum Ohm berdasarkan data arus dan tegangan yang terukur. Resistivitas semu memberikan gambaran distribusi resistivitas bawah permukaan di sepanjang jalur pengukuran. Nilai resistivitas sebenarnya di bawah permukaan diperoleh melalui proses inversi atau pencocokan kurva *fitting*.

Nilai resistivitas semu dipengaruhi oleh faktor geometri, K . Faktor geometri K ini bergantung pada susunan elektrode. Injeksi arus melalui elektrode bergantung pada resistivitas material (batuan) yang dilaluinya dan tercermin dalam nilai tegangan yang diukur. Sebaran nilai resistivitas bawah permukaan dapat dipetakan dengan melakukan pengukuran secara tersebar [?]. Sebaran pengukuran dilakukan mengikuti berbagai konfigurasi seperti Wenner, Schlumberger, dipol-dipol, dan sebagainya.

3. Metode Penelitian

Pada pengukuran resistivitas dengan konfigurasi dipol-dipol, penempatan elektrode potensial MN terletak di luar pasangan elektrode arus AB, seperti ditunjukkan pada Gambar ??, dimana a menunjukkan jarak antara pasangan elektrode arus ataupun elektrode potensial dan na merupakan jarak antara elektrode arus AB dengan elektrode potensial MN yang dapat mencapai jarak 1,5 km.



Gambar 3. Konfigurasi dipole-dipole pada metode geolistrik resistivity meter.

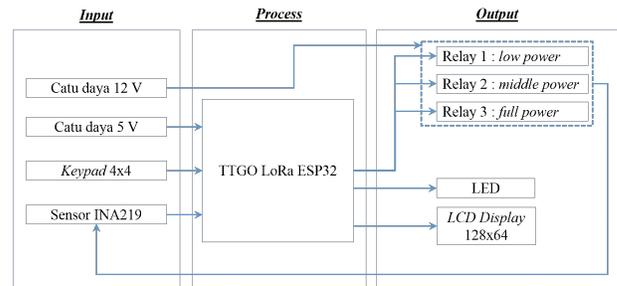
Konfigurasi seperti ini memungkinkan prosedur yang tidak sesuai antara waktu injeksi arus dengan waktu pengukuran potensial. Selain itu, semakin jauh titik injeksi arus dengan titik ukur potensial, maka memerlukan sumber arus yang lebih besar. Pada praktiknya, pemilihan arus dan ketepatan waktu injeksi sangat mempengaruhi kualitas data pengukuran. Pada penelitian ini, *prototyping* dibuat pada blok elektrode penginjeksi arus. Tujuan prototipe ini adalah untuk dapat melihat apakah memungkinkan penginjeksi arus dibuat dengan pengendali menggunakan TTGO LoRa ESP32 sehingga dapat dijadikan referensi dalam pembuatan penginjeksi arus pada skala lapangan. TTGO LoRa ESP32 merupakan mikrokontroler yang dilengkapi dengan berbagai teknologi komunikasi nirkabel, seperti LoRa, WiFi, dan Bluetooth sehingga pengendalian injeksi arus ini dapat dikembangkan kemudian untuk berbagai penggunaan lainnya yang melibatkan komunikasi nirkabel. Penginjeksi arus yang berada pada elektrode arus AB nantinya dapat berkomunikasi secara nirkabel dengan elektrode potensial MN. Misalkan komunikasi tersebut dilakukan untuk pengaturan modul penginjeksi arus agar dapat menginjeksikan arus sesuai dengan waktu pengukuran di elektrode potensial. Selain itu, prototipe juga dapat membantu memilih besar kecilnya sumber arus injeksi yang digunakan dalam prosedur pengukuran geolistrik.

Penginjeksi arus yang dibuat mempunyai beberapa pilihan nilai injeksi arus. Dalam hal ini, setiap pemilihan arus injeksi tersebut berasosiasi dengan daya injeksi yang berbeda. Ketika arus dengan pilihan *power* tertentu diinjeksikan pada suatu *dummy resistor*, maka arus akan mengalir melalui *dummy resistor* dan arus tersebut diukur menggunakan sensor INA219. Kemudian keandalan INA219 ditentukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor INA219 dengan *clamp meter*.

3.1 Diagram Blok Prototipe

Diagram blok dari prototipe penginjeksi arus dapat dilihat pada Gambar ???. Pada penelitian ini, prototipe penginjeksi arus dikendalikan menggunakan TTGO LoRa ESP32. Penginjeksian arus ke dummy resistor bersumber tegangan dari power supply sebesar 12 V. Kemudian sumber tegangan tersebut dihubungkan dengan rangkaian blok pembagi tegangan, seperti pada Gambar ??, yang berfungsi sebagai bagian pemilihan arus injeksi yang berasosiasi dengan *power* injeksi yang berbeda. Pemilihan dan penginjeksian arus dikendalikan oleh mikrokontroler TTGO LoRa ESP32 dengan *user interface Liquid Crystal Display (LCD)* dan *keypad*. Ketika catu daya 5 V dihubungkan dengan TTGO LoRa ESP32, maka prototipe akan menyala dan muncul tampilan “*Current Injection*” (Gambar ??) pada halaman depan penginjeksi arus. Melalui masukan dari *keypad*, pengguna diberikan tiga pilihan *power* injeksi

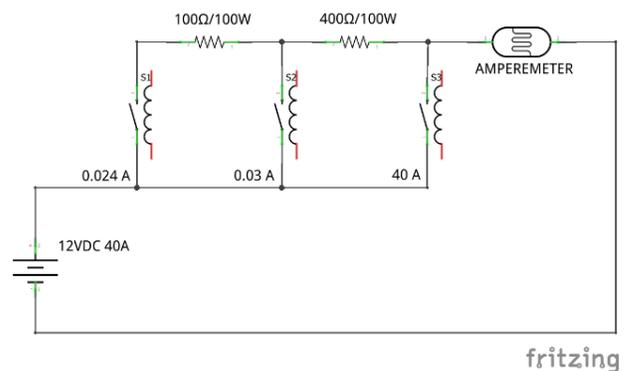
(Gambar ??). Jika pengguna menentukan satu pilihan *power* injeksi, maka sistem akan mengaktifkan *relay* tertentu yang terdapat pada rangkaian pembagi tegangan (Gambar ??). Kemudian, akan ada arus yang mengalir melalui *dummy resistor*. Besarnya arus yang mengalir pada *dummy resistor* diukur oleh sensor INA219 dan nilainya ditampilkan pada LCD.



Gambar 4. Diagram blok prototipe penginjeksi arus.

3.2 Rangkaian pada Pemilihan Arus Injeksi - Power Injection

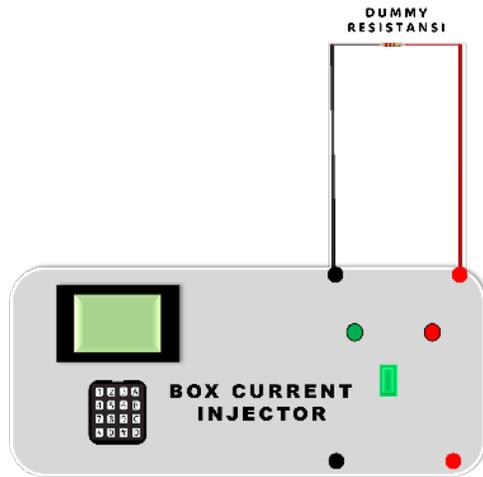
Supaya dapat menyediakan beberapa pilihan arus injeksi dengan *power* injeksi yang berbeda, maka pada prototipe ini ditambahkan rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan, seperti pada Gambar ??, digunakan untuk menyediakan 3 pilihan *power injection* pada prototipe, yakni *full power*, *middle power*, dan *low power*. Pada bagian ini digunakan 3 *relay* yang terhubung ke beberapa kondisi. *Relay 3* untuk *full power injection* tanpa *power resistor*. *Relay 2* untuk *power* injeksi sedang (terhubung ke *power resistor* 400 Ω). *Relay 1* untuk *power* injeksi paling rendah (terhubung ke *power resistor* 500 Ω).



Gambar 5. Rangkaian pembagi tegangan.

3.3 Penginjeksian Arus Menggunakan Dummy Resistor

Dalam pengaplikasiannya, penginjeksi arus dihubungkan dengan suatu *dummy resistor* seperti pada Gambar ???. Nilai resistansi bumi yang seringkali terukur di lapangan pada saat proses eksplorasi geolistrik sangat



Gambar 6. Penginjeksian arus pada *dummy resistor*.

bervariasi, mulai dari kisaran 300 Ω hingga orde kΩ. Sedangkan pada pengujian prototipe ini, digunakan nilai resistansi dari *dummy resistor* sebesar 50 Ω, 300 Ω dan 2 kΩ. Harapannya, nilai resistansi dari *dummy resistor* tersebut mewakili variasi nilai resistansi bumi yang akan terukur di lapangan.

Setelah *dummy resistor* terhubung ke prototipe penginjeksi arus, kemudian dipilih injeksi arus dengan *power* tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar ???. Setelah terpilih *power* tertentu untuk penginjeksian arus, maka *relay* yang terhubung ke blok pemilihan arus yang terpilih akan “ON” dan arus akan mengalir ke *dummy resistor*. Pada prototipe ini, arus yang mengalir pada *dummy resistor* diukur menggunakan sensor INA219. Beberapa penelitian lain telah menggunakan sensor INA219 untuk membaca nilai arus yang mengalir [?, ?, ?, ?]. Keandalan sensor INA219 ditentukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor INA219 dengan *clamp meter*.

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada perancangan prototipe penginjeksi arus ini, akan dilihat apakah penginjeksi arus ini dalam penggunaannya dapat menyediakan beberapa pilihan *power* injeksi. Selain itu, ketika dilakukan penginjeksian arus pada suatu *dummy resistor*, akan dilihat sejauh mana keandalan sensor yang digunakan.

4.1 Hasil Pemilihan Arus Injeksi – Power Injection

Pengujian pemilihan arus injeksi bertujuan untuk mengetahui apakah prototipe ini dapat menyediakan tiga pilihan arus injeksi yang berasosiasi dengan pilihan *power* pada saat menginjeksikan arus nantinya. Pada pengujian pemilihan arus injeksi digunakan 3 buah *relay* yang berfungsi untuk mengaktifkan pemilihan arus injeksi. *Relay* 1 terhubung dengan *power resistor* 500 Ω, *relay* 2 terhubung dengan *power resistor* 400 Ω, dan *relay* 3 tanpa dihubungkan dengan *power resistor*.



(a) Tampilan halaman depan penginjeksi arus.



(b) Tampilan halaman pemilihan power injeksi.

Gambar 7. Tampilan LCD (a) halaman depan penginjeksi arus dan (b) pemilihan arus injeksi – power injeksi pada prototipe.

Berdasarkan penggunaan catu daya 12 V dan nilai *power resistor* yang terhubung dengan *relay* pada saat menginjeksi arus, maka dapat dihitung daya untuk *relay* 1 sebesar 0,288 W (*low power injection*), *relay* 2 sebesar 0,36 W (*middle power injection*), dan *relay* 3 *full power injection*.

Hasil pengujian pemilihan arus injeksi dilakukan pada *relay* 1 dan *relay* 2. *Relay* 3, tanpa *power resistor* tidak dilakukan pengujian karena pengukuran arus pada kondisi tersebut akan menyebabkan *short circuit*. Hasil pengujian pemilihan arus injeksi ditunjukkan pada Tabel ???. Pada hasil pengukuran sensor ke-10, diperoleh nilai pengukuran arus yang berbeda. Hal tersebut mungkin dikarenakan pembacaan nilai arus yang dilakukan tersebut berada pada saat injeksi arus belum mencapai *steady state*. Oleh karena itu, untuk pembacaan arus disarankan tidak tepat pada saat injeksi arus dimulai. Akan tetapi pembacaan arus dilakukan kurang lebih 1 detik dari awal penginjeksian arus. Tabel ?? menunjukkan bahwa prototipe yang dibuat dapat menyediakan tiga pemilihan *power injeksi*. Pada saat *relay* 1 ON, diperoleh nilai arus rata-rata yang terukur adalah 0,0205 A, sedangkan pada saat *relay* 2 ON, diperoleh nilai arus rata-rata yang terukur adalah

Tabel 1. Hasil pengujian pemilihan arus injeksi.

No.	Relay					
	1			2		
	I (A)		Err Abs (%)	I (A)		Err Abs (%)
Calc	Meas.	Calc		Meas.		
1	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
2	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
3	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
4	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
5	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
6	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
7	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
8	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
9	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
10	0,024	0,03	25	0,0304	0,03	1,32
11	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
12	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
13	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
14	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
15	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
16	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
17	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
18	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
19	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
20	0,024	0,02	16,67	0,0304	0,03	1,32
	12 A	0,0205	17,08	II (A)	0,03	1.32
	Stdev (A)	0,0022		Stdev (A)	$1,7e^{-17}$	
	E. Rel (%)	10,91		E. Rel (%)	$5,93e^{-14}$	

Keterangan tabel:

- Calc.: Nilai arus hasil perhitungan
- Meas.: Nilai arus hasil pengukuran
- Stdev: Standar deviasi dari pengukuran
- Err Abs: Kesalahan absolut sebagai perbandingan nilai hasil pengukuran dengan perhitungan.
- E. Rel: Kesalahan relatif yang menunjukkan varians data pengukuran.

0,03 A. Seperti diketahui di awal, bahwasanya catu daya yang digunakan untuk mengalirkan arus tersebut adalah 12 V. Oleh karena itu, berdasarkan hasil pengujian dapat diperoleh *power* injeksi 0,246 W untuk *relay 1 (low power injection)*, dan 0,36 W untuk *relay 2 (middle power injection)*. Sekali lagi, *relay 3* dalam kondisi *full power injection* karena tanpa penambahan *power resistor* dalam rangkaiannya.

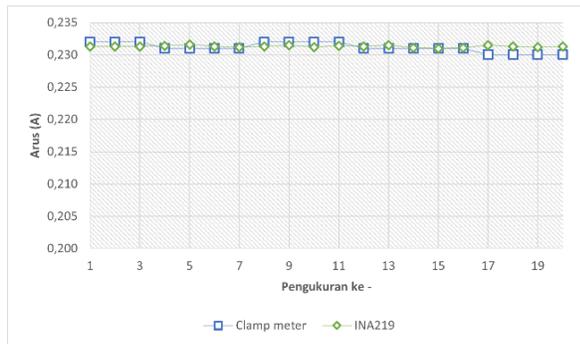
Pada kondisi pemilihan *low power injection*, *relay 1 ON*, diperoleh nilai rata-rata arus sebesar $0,0205 \pm 0,002$ A dan *relative error* sebesar 10,9%, serta *Means Absolute Percentage Error (MAPE)* sebesar 17,08%. MAPE menunjukkan rata-rata *absolute error* yang dihasilkan pada pengukuran. Nilai MAPE berada pada rentang 10–20% yang artinya hasil pengukuran baik. Kemudian nilai *relative error* berada pada rentang 5–15% yang artinya variasi pengukuran sedang dan masih dapat diterima dalam banyak aplikasi. Pada

pemilihan arus *relay 2*, diperoleh nilai rata-rata arus sebesar $0,03 \pm 1,7 \times 10^{-17}$ A dan *relative error* sebesar $5,93 \times 10^{-14}\%$, serta *Means Absolute Percentage Error (MAPE)* sebesar 1,32%. Nilai MAPE berada pada rentang < 10% yang artinya hasil pengukuran sangat baik. Kemudian *relativeerror* berada pada rentang < 1% yang artinya variasi pengukuran sangat rendah dan hasil pengukuran sangat konsisten.

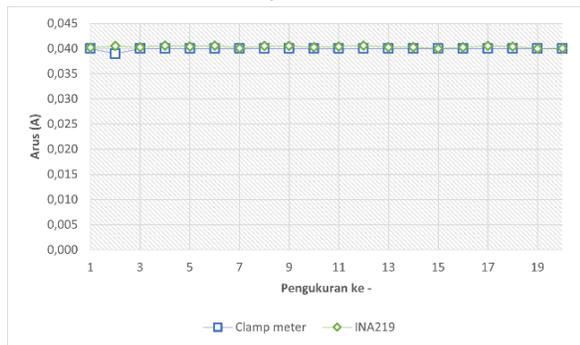
4.2 Penginjeksian Arus Menggunakan Dummy Resistor

Prototipe penginjeksi arus dihubungkan ke *dummy resistor* sehingga ketika pemilihan injeksi arus dilakukan, maka arus mengalir ke *dummy resistor* dan diukur menggunakan sensor INA219. Pengujian injeksi arus dilakukan pada 3 buah *dummy resistor*, yakni 50 Ω, 300 Ω dan 2 kΩ. Pengukuran arus yang diinjeksikan ke *dummy resistor* dibandingkan dengan hasil pembacaan

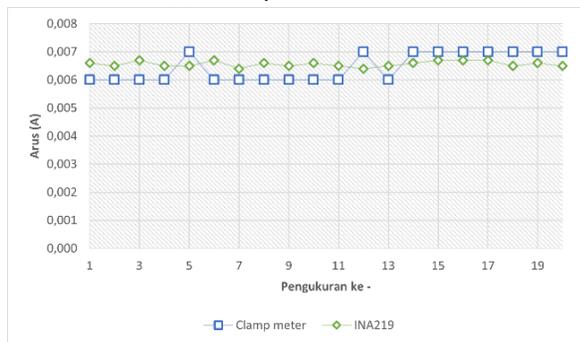
clamp meter. Hasil pengujiannya ditunjukkan pada Gambar ??.



(a) Dummy resistor 50 Ω.



(b) Dummy resistor 300 Ω.



(c) Dummy resistor 2 kΩ.

Gambar 8. Hasil penginjeksian arus pada dummy resistor (a) 50 Ω, (b) 300 Ω, dan (c) 2 kΩ.

Gambar ?? menunjukkan hasil pengukuran injeksi arus pada dummy resistor 50 Ω. Rata-rata arus terukur sebesar $0,2313 \pm 0,00015$ A, relative error sebesar 0,2312%, dan MAPE sebesar 0,27%. Gambar ?? menunjukkan hasil pengukuran injeksi arus pada dummy resistor 300 Ω. Rata-rata arus terukur sebesar $0,0403 \pm 0,0002$ A, relative error sebesar 0,4722%, dan MAPE sebesar 0,99%. Gambar ?? menunjukkan hasil pengukuran injeksi arus pada dummy resistor 2 kΩ. Rata-rata arus terukur sebesar $0,0066 \pm 0,0001$ A, relative error sebesar 1,5051%, dan MAPE sebesar 7,8%. Pengukuran arus menggunakan sensor INA219

memberikan hasil pengukuran yang sangat konsisten karena mempunyai relative error yang $< 1\%$ (pada dummy resistor 50 Ω dan 300 Ω). Akan tetapi pada saat mengukur arus 0,0066 A, relative error naik menjadi 1,5%. Hal tersebut masih menunjukkan konsistensi hasil pengukuran. Selain itu, absolute error untuk semua pengukuran berada pada rentang $< 10\%$, yang artinya pembacaan INA219 memberikan hasil yang sangat baik meskipun digunakan untuk mengukur nilai arus yang sangat kecil, yakni sekitar 6,6 mA.

Pada penginjeksian arus menggunakan dummy resistor, prototipe penginjeksi arus ini memberikan konsistensi hasil pengukuran yang baik dan mempunyai validasi yang baik pula karena nilai absolute error dari pembacaan sensor INA219 $< 10\%$. Bahkan pada saat mengukur nilai arus yang sangat kecil pun, perangkat ini masih memberikan konsistensi dan validasi yang baik. Dummy resistor dengan nilai resistansi 50 Ω, 300 Ω dan 2 kΩ dipilih karena mewakili nilai resistansi bumi yang seringkali terukur di lapangan. Nilai resistansi bumi umumnya terukur antara 300 Ω hingga orde kΩ. Oleh karena itu, prototipe ini kemungkinan dapat diimplementasikan langsung untuk mengukur tahanan bumi.

5. Kesimpulan

Prototipe penginjeksi arus dengan tiga jenis daya injeksi yang dikendalikan menggunakan TTGO LoRa ESP32 telah berhasil diimplementasikan. Pada blok pemilihan arus injeksi digunakan rangkaian pembagi tegangan. Arus yang diinjeksikan dari prototipe yang terhubung dengan dummy resistor berasosiasi dengan penginjeksian arus ke bumi pada eksplorasi geolistrik di lapangan. Pada saat penginjeksian arus pada dummy resistor, pembacaan sensor INA219 memberikan hasil pengukuran yang konsisten dengan Relative Error $< 2\%$ untuk setiap pengukurannya. Hal tersebut menunjukkan bahwa prototipe ini mempunyai reliabilitas yang baik. Selain itu, setiap pengukuran menghasilkan MAPE $< 10\%$, yang menunjukkan pembacaan sensor INA219 memberikan hasil yang sangat baik. Untuk pengembangan selanjutnya, dibutuhkan penginjeksi arus dengan power yang lebih besar supaya dapat diimplementasikan pada eksplorasi geolistrik di lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] M. Syukri, *Pengantar Geofisika*. Syiah Kuala University Press, 2020.
- [2] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied geophysics*. Cambridge university press, 1990.
- [3] J. Safitri, M. Yusfi *et al.*, "Rancang bangun alat ukur resistivitas pada lapisan tipis menggunakan metode

- 4 probe berbasis atmega8535 dengan tampilan lcd karakter 2 x 16,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 3, no. 2, pp. 65–73, 2014.
- [4] J. Adler, S. Ginting, A. Abdullah, and A. Akhbar, “The design of resistivity tool for subsurface based on microcontroller,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 407, no. 1. IOP Publishing, 2018, p. 012123.
- [5] W. Widodo, B. P. Lapanporo, and M. I. Jumarang, “Rancang bangun alat geolistrik berbasis arduino mega2560,” *Physics Communication*, vol. 2, no. 1, pp. 52–62, 2018.
- [6] F. Huda, H. Harmadi, and A. F. Pohan, “Prototipe rancang bangun alat geolistrik menggunakan arduino uno r3 dan transceiver nrf24l01+,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 10, no. 4, pp. 435–444, 2021.
- [7] E. A. Irianto, “Rancang bangun resistivity meter digital dengan metode four point probe untuk menentukan hambatan jenis tanah,” *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, vol. 3, no. 2, 2014.
- [8] U. Kutbay and F. Hardalaç, “Development of a multiprobe electrical resistivity tomography prototype system and robust underground clustering,” *Expert Systems*, vol. 34, no. 3, p. e12206, 2017.
- [9] M. de la Vega, M. Bongiovanni, and V. Grünhut, “Design of a low-cost electrical resistivity meter for near surface surveys,” *Earth and Space Science*, vol. 8, no. 12, p. e2020EA001575, 2021.
- [10] A. O. Cruz Júnior, C. F. da Ponte-Neto, and A. Wiermann, “Design and construction of an automated and programmable resistivity meter for shallow subsurface investigation,” *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 15–23, 2023. [Online]. Available: <https://gi.copernicus.org/articles/12/15/2023/>
- [11] K. B. Burhanudin, M. H. B. Jusoh, Z. I. A. Latiff, A. B. Zainuddin, and M. A. B. Talib, “Prototype development for real-time gic measurement using lora,” in *2020 IEEE 5th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT)*, 2020, pp. 7–11.
- [12] J. M. K. Dewi, “Penerapan internet of things pada sistem monitoring lahan menggunakan ttgo lora esp32,” Ph.D. dissertation, 2022.
- [13] F. W. Prameswari, A. S. Bahri, and W. Parnadi, “Analisa resistivitas batuan dengan menggunakan parameter dar zarrouk dan konsep anisotropi,” *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 1, no. 1, pp. B15–B20, 2012.
- [14] M. W. Nugroho, F. A. N. Farida A, and K. Maya, “Analisis struktur lapisan bawah permukaan dengan metode geolistrik dalam perencanaan pondasi,” *Jurnal CIVILLA*, vol. 3, no. 2, pp. 186–191, 2018.
- [15] M. H. Loke, O. Kuras, J. Chambers, D. Rucker, and P. Wilkinson, “Instrumentation, electrical resistivity,” *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, pp. 1–7, 2020.
- [16] C. Smith, J. Satme, J. Martin, A. R. Downey, N. Vitzilaios, and J. Imran, “Uav rapidly-deployable stage sensor with electro-permanent magnet docking mechanism for flood monitoring in undersampled watersheds,” *HardwareX*, vol. 12, p. e00325, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000700>
- [17] M. El-hajj, H. Mousawi, and A. Fadlallah, “Analysis of lightweight cryptographic algorithms on iot hardware platform,” *Future Internet*, vol. 15, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1999-5903/15/2/54>
- [18] E. O. Lange, J. M. Jose, S. Benedict, and M. Gerndt, “Automated energy modeling framework for microcontroller-based edge computing nodes,” in *International Conference on Advanced Network Technologies and Intelligent Computing*. Springer, 2022, pp. 422–437.
- [19] M. H. Qahtan, E. A. Mohammed, and A. J. Ali, “Iot-based electrical vehicle’s energy management and monitoring system,” *Open Access Library Journal*, vol. 9, no. 7, pp. 1–15, 2022.