

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA ALAT UKUR *SELF
POTENTIAL* BERBASIS ADC ADS1115**

TUGAS AKHIR



M. Rusydi
2201010033

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI KEMARITIMAN
UNIVERSITAS MARITIM RAJA ALI HAJI
TANJUNGPINANG
2026**

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA ALAT UKUR *SELF*
POTENTIAL** BERBASIS ADC ADS1115

Tugas Akhir

Skema Skripsi

Tugas Akhir diajukan sebagai salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana

Teknik pada Program Studi Teknik Elektro



M. Rusydi

2201010033

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI KEMARITIMAN
UNIVERSITAS MARITIM RAJA ALI HAJI
TANJUNGPINANG
2026**

PERNYATAAN MENGENAI TUGAS AKHIR DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir berjudul “Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur *Self Potential* Berbasis ADC ADS1115” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Apabila di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar dan melanggar peraturan yang berlaku dalam karya tulis dan hak intelektual, maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima untuk ditarik kembali oleh Universitas Maritim Raja Ali Haji dan menerima sanksi lainnya sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Universitas Maritim Raja Ali Haji.

Tanjungpinang, Mei 2026



M. Rusydi
NIM 2201010033



© Hak Cipta Milik Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tahun 2026

Hak Cipta Dilindungi Undang- Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah; dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan Universitas Maritim Raja Ali Haji.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Maritim Raja Ali Haji.



HALAMAN PERSETUJUAN

Judul : Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur *Self Potential* Berbasis ADC ADS1115
Nama : M. Rusydi
NIM : 2201010033
Program Studi : Teknik Elektro
Tanggal Persetujuan : 28-Maret-2026

Disetujui oleh,
Komisi Pembimbing


Hollanda Arief Kusuma, S.IK, M.Si.
(Ketua)


Bavitra, M.Si.
(Anggota)

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur *Self Potential* Berbasis ADC ADS1115
Nama : M. Rusydi
NIM : 2201010033

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Komisi Penguji sebagai bagian persyaratan yang diperlukan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro dan Informatika, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji.

KOMISI PENGUJI

Ketua	: Rusfa, S.T., M.T	(..... )
Anggota I	: Septia Refly, S.Pd., M.Si	(..... )
Anggota II	: M. Hasbi Sidqi Alajuri, S.I.K., M.Si	(..... )
Anggota III	: Hollanda Arief Kusuma, S.I.K., M.Si	(..... )
Anggota IV	: Bavitra, M.Si.	(.....)

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Informatika


Hollanda Arief Kusuma, S.I.K., M.Si
NIP. 198904012019031016

Tanggal Ujian: 28 April 2025

Tanggal Lulus: 20 Mei 2026

ABSTRAK

M. Rusydi. Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur *Self Potential* Berbasis ADC ADS1115. Dibimbing oleh HOLLANDA ARIEF KUSUMA dan BAVITRA.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengukuran *Self Potential* (SP) berbasis mikrokontroler ESP32 dengan modul ADC ADS1115 beresolusi 16-bit. Sistem dirancang untuk membaca beda potensial dalam orde milivolt menggunakan konfigurasi diferensial serta menyimpan data secara otomatis ke media penyimpanan. Elektroda SP1 hingga SP4 dipasang secara linear dengan jarak antar elektroda 5 meter untuk memperoleh distribusi potensial tanah secara spasial.

Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan *hardware*, *electrical*, dan *firmware*, uji kinerja alat, kalibrasi, serta uji lapang dan analisis data. Pengujian dilakukan pada dua lokasi berbeda, yaitu tanah bauksit di Kampus UMRAH Senggarang dan tanah pesisir berpasir di Pantai Tanjung Siambang. Hasil kalibrasi menunjukkan tingkat akurasi pengukuran di atas 99,25%, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat ketelitian yang baik.

Hasil pengukuran lapangan menunjukkan adanya perbedaan nilai *Self Potential* pada kedua lokasi, yang mengindikasikan bahwa sistem mampu mendeteksi variasi karakteristik tanah. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan bekerja dengan baik, stabil, dan layak digunakan sebagai alat monitoring *Self Potential* untuk pengukuran lapangan.

Kata kunci: *Self Potential*, ESP32, ADS1115, beda potensial, diferensial.

ABSTRACT

M. RUSYDI. Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur *Self Potential* Berbasis ADC ADS1115. Dibimbing oleh HOLLANDA ARIEF KUSUMA dan BAVITRA.

This study aims to design and implement a Self Potential (SP) measurement system based on the ESP32 microcontroller using the 16-bit ADS1115 analog-to-digital converter. The system measures potential differences in the millivolt range using differential configuration and automatically stores the data. SP1 to SP4 electrodes were arranged linearly with a 5-meter spacing to obtain spatial soil potential distribution.

The research stages include literature study, hardware, electrical, and firmware design, system testing, calibration, field testing, and data analysis. Field tests were conducted at two different locations: bauxite soil at UMRAH Senggarang Campus and sandy coastal soil at Tanjung Siambang Beach. Calibration results showed an accuracy level above 90,25%, indicating good measurement precision.

Field results showed differences in Self Potential values between the two locations, demonstrating that the system can detect variations in soil characteristics. Overall, the developed system operates properly, stably, and is suitable for field Self Potential monitoring applications.

Keywords: *Self Potential, ESP32, ADS1115, potential difference, differential.*

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat kesehatan, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik. Proses penyusunan tugas akhir ini dilaksanakan pada tahun 2025 hingga 2026 dengan judul “*Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur Self Potential Berbasis ADC ADS1115*”.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah membantu, memberikan dukungan, arahan, serta motivasi sehingga laporan ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan, kasih sayang, perhatian, serta semangat kepada penulis selama menjalani perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir ini.
3. Keluarga besar penulis yang selalu memberikan motivasi, bantuan, dan dukungan baik secara moral maupun materi selama proses pendidikan berlangsung.
4. Bapak Hollanda Arief Kusuma, S.I.K., M.Si. dan Bavitra, M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, ilmu, dan bimbingan kepada penulis selama proses penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir.
5. Bapak Tonny Suhendra, S.T., M.Cs., selaku dosen Pembimbing Akademik.
6. Seluruh dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, dan pembelajaran kepada penulis selama masa perkuliahan.
7. Seluruh staf dan pihak kampus yang telah membantu penulis dalam urusan akademik maupun administrasi selama masa studi.

8. Teman-teman Teknik Elektro angkatan 2022 yang telah memberikan dukungan, bantuan, kebersamaan, serta semangat selama menjalani perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir ini.
9. Sahabat dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu, memberikan semangat, serta dukungan kepada penulis baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi yang berguna bagi pembaca maupun pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknik Elektro.

Tanjungpinang, 20 Mei 2026



M. Rusydi



DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Perumusan Masalah	3
C. Batasan Penelitian	3
D. Tujuan Penelitian	4
E. Manfaat Penelitian	4
BAB II KAJIAN LITERATUR	5
A. Tinjauan Pustaka	5
B. Landasan Teori.....	7
1. Porouspot.....	7
2. Rangkaian pengukuran <i>Self Potential (SP)</i>	8
3. Ilustrasi Arah Pengukuran <i>Self Potential (SP)</i>	9
4. ESP32	9
5. Modul ADC ADS1115 (<i>Analog to Digital Converter</i>).....	11
6. Modul GPS <i>NEO-7</i>	12

7. Modul SD Card	13
8. Modul <i>step-down</i>	14
9. LCD 20x4.....	15
10. Panel Surya.....	17
11. <i>Solar Charge Controller</i> (SCC).....	17
12. Aki.....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	19
A. Waktu dan Tempat Penelitian	19
B. Bahan dan Alat.....	20
C. Prosedur Pelaksanaan Penelitian.....	21
D. Uji Fungsional.....	23
E. Perancangan Sistem	26
1. Perancangan <i>Hardware</i>	28
2. Perancangan <i>Electrical</i>	29
3. Perancangan <i>Firmware</i>	30
F. Uji Laboratorium.....	32
1. Kalibrasi Sensor	33
2. Uji Elektroda Poruspot.....	35
3. Konsumsi Daya	35
G. Uji Keseluruhan Sistem.....	36
H. Uji Lapang.....	36
I. Analisis Data	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
A. Hasil Uji Fungsional	39
1. Modul ADC ADS1115.....	39
2. Modul GPS <i>NEO-7</i>	39

3. Modul SD Card	40
4. Modul LCD 20x4	41
B. Hasil Pengembangan <i>Electrical</i>	41
C. Hasil Pengembangan <i>Firmware</i>	43
D. Hasil Pengembangan <i>Hardware</i>	47
E. Uji Laboratorium.....	49
1. Hasil Kalibrasi Modul ADC ADS1115	49
2. Hasil Uji Elektroda Poropspot	54
3. Hasil Konsumsi Daya.....	55
F. Hasil Uji Keseluruhan Sistem	57
G. Hasil Uji Lapang	58
1. Hasil Pengujian Tanah Bauksit.....	58
2. Hasil Pengujian Tanah Pesisir.....	60
3. Hasil Uji Statistik Deskriptif Tanah Bauksit.....	62
4. Hasil Uji Statistik Deskriptif Tanah Pesisir	64
5. Hasil Peta Kontur Tanah Bauksit.....	67
6. Hasil Peta Kontur Tanah Pesisir	68
H. Analisis Delta SP Tanah Bauksit dan Tanah Pesisir	70
I. Pembahasan.....	71
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	75
A. Simpulan	75
B. Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi ESP32 Dev Module	11
Tabel 2. Spesifikasi Modul ADC ADS1115	12
Tabel 3. Spesifikasi Modul GPS <i>NEO-7</i>	13
Tabel 4. Spesifikasi Modul SD Card.....	14
Tabel 5. Spesifikasi Modul <i>Step Down</i>	15
Tabel 6. Spesifikasi LCD 20x4	16
Tabel 7. Alat yang digunakan Penelitian	20
Tabel 8. Bahan yang digunakan Penelitian	20
Tabel 9. Hasil Perhitungan Error, Akurasi, dan RMSE pada Tegangan 20 Mv ...	51
Tabel 10. Hasil Kalibrasi Regresi Linier Modul ADC ADS1115	52
Tabel 11. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-1	62
Tabel 12. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-2	63
Tabel 13. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-3	64
Tabel 14. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-1	65
Tabel 15. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-2	66
Tabel 16. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-3	67
Tabel 17. Hasil Perhitungan Delta SP pada Tanah Bauksit Selama 3 Hari	71
Tabel 18. Hasil Perhitungan Delta SP pada Pesisir Selama 3 Hari	71

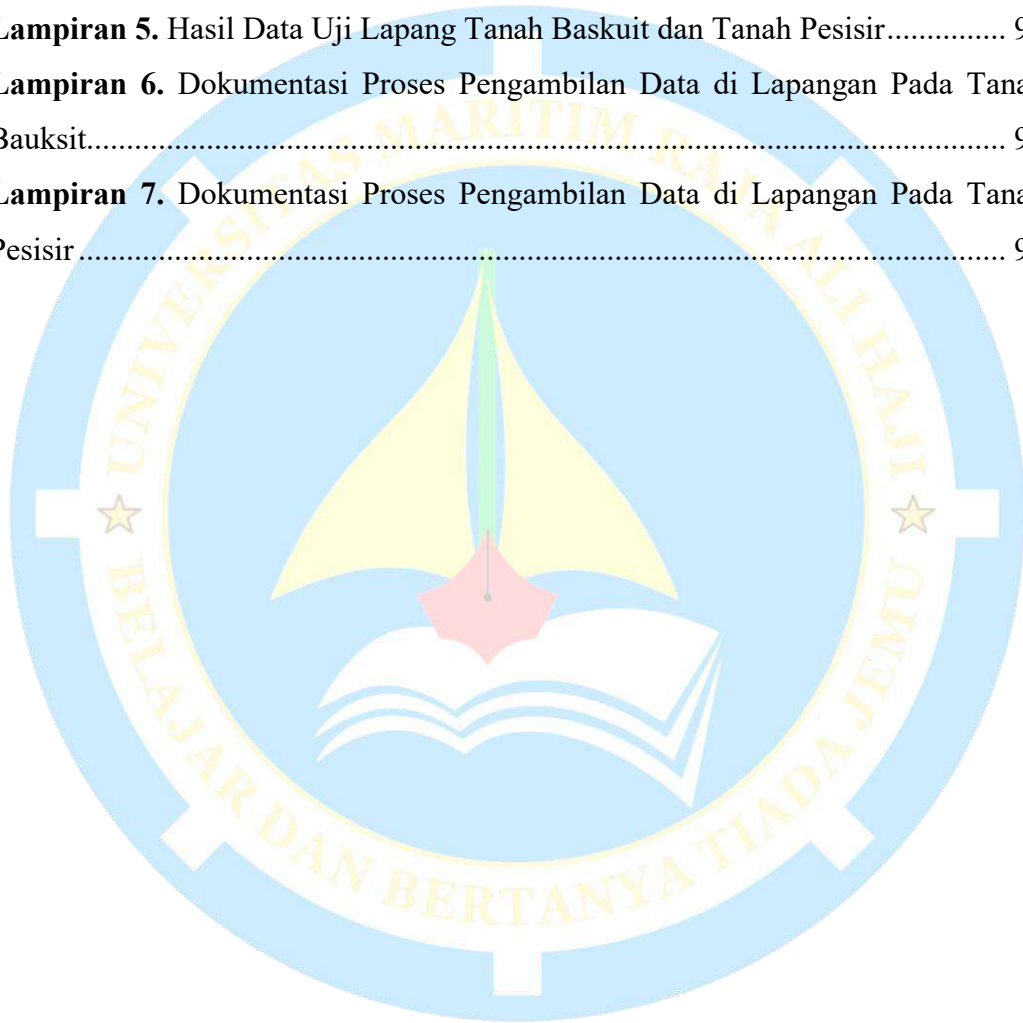
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Elektroda Non-Polarisasi.....	8
Gambar 2. Diagram prinsip dasar untuk pengukuran <i>Self Potensial</i>	9
Gambar 3. Ilustrasi Pengukuran <i>Self Potensial</i> Horizontal (a) dan Vertikal (b).....	9
Gambar 4. ESP32 Dev Module.....	10
Gambar 5. Modul ADC ADS1115.....	12
Gambar 6. Modul GPS <i>NEO-7</i>	13
Gambar 7. Modul SD Card	14
Gambar 8. Modul <i>Step Down</i>	15
Gambar 9. LCD 20x4.....	16
Gambar 10. Panel Surya.....	17
Gambar 11. <i>Solar Charge Controller</i>	18
Gambar 12. Aki.....	18
Gambar 13. Lokasi Penelitian	19
Gambar 14. Diagram Alir Prosedur Penelitian	23
Gambar 15. Rangkaian Modul ADC ADS1115.....	24
Gambar 16. Rangkain Modul GPS <i>NEO-7</i>	25
Gambar 17. Rangkain Modul SD Card.....	26
Gambar 18. Rangkaian Modul LCD 20x4	26
Gambar 19. Diagram Blok Perancangan Sistem.....	27
Gambar 20. Desain 3D Perancangan Alat Keseluruhan	28
Gambar 21. Desain 3D Peletakan Komponen di dalam Box Panel	29
Gambar 22. Skematik Rangkaian.....	30
Gambar 23. Diagram Alir Program Pengukuran Data	32
Gambar 24. Ilustrasi Uji Lapang.....	37
Gambar 25. Hasil uji Modul ADC ADS1115	39
Gambar 26. (a) Hasil uji modul GPS <i>NEO-7</i> , (b) Dokumentasi uji modul <i>GPS NEO-7</i>	40
Gambar 27. (a) Hasil uji Modul SD Card, (b) Dokumentasi uji modul SD Card.	41
Gambar 28. (a) Hasil Uji LCD 20x4, (b) Dokumentasi Uji LCD 20x4.....	41
Gambar 29. Peletakan Komponen pada box panel	43

Gambar 30. Program Library Secara Keseluruhan	43
Gambar 31. Konfigurasi Pin LED hijau dan merah, Modul SD Card dan Variabel	44
Gambar 32. Program Variabel dan Pin Inisialisasi	45
Gambar 33. Kode program Koreksi Regresi Linier	45
Gambar 34. Kode Program LCD 20x4	46
Gambar 35. Kode program SDCard.....	46
Gambar 36. (a) Ukuran rangka besi hollow, (b) ukuran box panel komponen.....	48
Gambar 37. Pemasangan Kabel pengukuran elektroda <i>Self Potensial</i>	48
Gambar 38. Bentuk hasil pembuatan elektroda <i>Self Potensial</i>	49
Gambar 39. Rangkaian Kalibrasi Modul ADC ADS1115	50
Gambar 40. Dokumentasi proses kalibrasi Modul ADC ADS1115	50
Gambar 41. (a) kanal SP1, (b) kanal SP2, (c) kanal SP3, dan (d) kanal SP4	52
Gambar 42. Kode program hasil regresi linier	53
Gambar 43. Grafik Perbandingan RMSE dan Akurasi Modul ADC ADS1115 ...	54
Gambar 44. Dokumentasi uji elektroda porospot	55
Gambar 45. Alat ukur <i>volt current</i> meter untuk pengujian konsumsi daya.....	56
Gambar 46. Hasil Pengujian Konsumsi Daya Selama 1 Jam.....	56
Gambar 47. Hasil Uji Keseluruhan Sistem	58
Gambar 48. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3	60
Gambar 49. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3	61
Gambar 50. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3	68
Gambar 51. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3	69

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Kalibrasi Modul ADC ADS1115.....	84
Lampiran 2. Hasil Perhitungan Kalibrasi Modul ADC ADS1115 Error, Akurasi, dan RMSE	86
Lampiran 3. Hasil Perbandingan Data Kalibrasi Modul ADC ADS111.....	88
Lampiran 4. Keseluruhan Kode Program Pengukuran <i>Self Potential</i>	89
Lampiran 5. Hasil Data Uji Lapang Tanah Baskuit dan Tanah Pesisir.....	90
Lampiran 6. Dokumentasi Proses Pengambilan Data di Lapangan Pada Tanah Bauksit.....	91
Lampiran 7. Dokumentasi Proses Pengambilan Data di Lapangan Pada Tanah Pesisir	92



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Self Potential (SP) merupakan salah satu metode geofisika pasif yang digunakan untuk mengukur beda potensial listrik alami yang muncul akibat adanya pergerakan fluida bermuatan atau proses elektrokimia di bawah permukaan tanah [1]. Dari perbedaan potensial tersebut, dapat diperoleh informasi mengenai kondisi bawah permukaan tanpa harus melakukan pengeboran atau penggalian [2]. Oleh karena itu, metode SP sering digunakan dalam berbagai bidang, seperti hidrogeologi, geoteknik, lingkungan, serta eksplorasi sumber daya air tanah [3]. Keunggulan utama metode *Self Potential* (SP) ini adalah pengukuran yang praktis dan sederhana, biaya rendah, tidak merusak struktur tanah, dan mampu memberikan hasil pengukuran yang cukup informatif untuk analisis kondisi geologi di bawah permukaan [4].

Namun, proses pengukuran SP di lapangan selama ini masih banyak dilakukan secara manual. Pengukuran SP dilakukan menggunakan sepasang elektroda Cu/CuSO₄ yang dihubungkan ke multimeter digital untuk mencatat perbedaan tegangan antara dua titik [5]. Setiap pengukuran harus dilakukan secara bergantian dan dicatat secara manual oleh operator [6]. Pengukuran secara manual membutuhkan waktu yang lama dan rentan terhadap kesalahan pencatatan akibat faktor manusia. Hal ini membuat pengukuran SP menjadi kurang efisien untuk kegiatan pengukuran jangka panjang atau penelitian yang membutuhkan pengambilan data berkelanjutan di lapangan.

Keterbatasan pada pengukuran SP secara manual memerlukan pengembangan sistem yang mampu mencatat data secara otomatis dan berkesinambungan di lapangan. Sistem pengukuran *Self Potential* otomatis menjadi solusi yang tepat karena dapat bekerja dengan lebih efisien, presisi, dan minim kesalahan manusia. Prinsip kerja sistem pengukuran *Self Potential* otomatis yaitu membaca nilai tegangan antara dua buah elektroda secara langsung, menyimpan data secara digital, serta meminimalkan kesalahan akibat pencatatan manual. Data nilai tegangan tersebut direkam dan disimpan secara *real-time*, sehingga proses

pengukuran menjadi lebih efisien, akurat, dan konsisten tanpa memerlukan pengukuran manual. Tegangan yang dihasilkan umumnya sangat kecil, hanya berkisar dalam orde milivolt (mV), sehingga dibutuhkan sistem pengukuran dengan sensitivitas tinggi dan ketahanan terhadap gangguan lingkungan agar hasil pengukuran tetap stabil dan akurat meskipun dalam kondisi lapangan yang berbeda [7].

Meskipun sistem pengukuran *Self Potential* otomatis telah banyak dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan pengukuran manual, beberapa penelitian menunjukkan bahwa alat-alat tersebut masih memiliki kelemahan dalam hal sensitivitas dan kestabilan pembacaan tegangan [8]. Kelemahan ini terutama terlihat pada pengukuran *Self Potential* yang berada pada orde milivolt, di mana sistem akuisisi data yang digunakan belum sepenuhnya mampu menangkap variasi potensial alami tanah secara optimal [9]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengembangan alat pengukuran *Self Potential* masih memerlukan peningkatan, khususnya pada sistem pengukuran dan pengolahan data.

Pengukuran *Self Potential* menghasilkan sinyal tegangan yang sangat kecil, umumnya berada pada orde milivolt [10]. Oleh karena itu, sistem pengukuran yang digunakan harus memiliki kemampuan akuisisi data dengan resolusi dan ketelitian yang tinggi agar variasi potensial alami tanah dapat terukur dengan baik. Pada penelitian ini digunakan modul ADC ADS1115 sebagai bagian dari sistem pengukuran *Self Potential*. Modul ADC ADS1115 merupakan konverter analog ke digital beresolusi 16-bit yang dirancang untuk membaca sinyal tegangan kecil dengan tingkat presisi yang lebih baik dibandingkan ADC internal pada mikrokontroler [11]. Penggunaan modul ADC ADS1115 diharapkan mampu mengatasi kelemahan pada alat sebelumnya serta meningkatkan akurasi dan kestabilan pembacaan beda potensial antara dua elektroda yang ditanam di dalam tanah.

Selain itu, sistem pengukuran SP juga dilengkapi dengan modul GPS untuk mencatat titik koordinat pada setiap pengukuran agar data yang diperoleh memiliki informasi lokasi yang akurat dan mudah dianalisis kembali. Dengan adanya GPS, pengguna dapat mengetahui letak pasti dari setiap pengambilan data SP sehingga hasilnya bisa dibandingkan dengan kondisi geologi di area tersebut [12]. Sebagai

sumber energi tambahan, alat pengukuran SP otomatis menggunakan panel surya yang berfungsi untuk mengisi baterai sebagai media penyimpan energi. Rancangan ini membuat sistem dapat bekerja secara mandiri dalam jangka waktu lama tanpa memerlukan sumber listrik tambahan. Pemanfaatan tenaga surya juga menjadikan alat ini lebih efisien dan ramah lingkungan, serta memungkinkan pengambilan data dilakukan secara berkelanjutan di lapangan yang jauh dari jaringan listrik [13].

Pengembangan sistem pengukuran *Self Potential* otomatis diharapkan proses pengambilan data di lapangan dapat dilakukan secara lebih efisien, akurat, dan konsisten tanpa harus melakukan pengukuran berulang secara manual. Rancangan ini menjadi langkah penting dalam menghadirkan alat ukur yang praktis, andal, dan sesuai untuk kebutuhan penelitian *Self Potential* di bidang geofisika lingkungan dan hidrogeologi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk merancang dan menguji kinerja alat ukur *Self Potential* berbasis ADC ADS1115.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang alat ukur *Self Potential* (SP) yang mampu mendigitalisasi hasil pengukuran beda potensial listrik dari elektroda Cu/CuSO₄ menggunakan ADC ADS1115 secara akurat dan stabil.
2. Bagaimana kinerja alat ukur *Self Potential* berbasis ADC ADS1115 dalam membaca dan merekam sinyal *Self Potential* yang berada pada orde milivolt.

C. Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka ruang lingkupnya dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada rancang bangun dan uji kinerja alat ukur *Self Potential* (SP) berbasis mikrokontroler ESP32 sebagai sistem pengolah dan pengendali data.
2. Pengukuran *Self Potential* dilakukan dengan membaca beda potensial listrik antara dua elektroda Cu/CuSO₄ yang ditempatkan pada titik pengukuran di

permukaan tanah, di mana proses pembacaan sinyal dilakukan menggunakan mode *differential* input pada ADC.

3. Sistem alat menggunakan modul ADC ADS1115 sebagai konverter analog ke digital untuk mendigitalisasi sinyal tegangan *Self Potential*, serta dilengkapi dengan modul GPS untuk pencatatan koordinat lokasi pengukuran dan sistem catu daya berbasis baterai dan panel surya.
4. Pengujian alat difokuskan pada kinerja pembacaan data, meliputi aspek akurasi, kestabilan, dan keandalan hasil pengukuran, sedangkan interpretasi geologi hanya digunakan sebagai konteks penerapan alat dan tidak menjadi fokus utama penelitian.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menguji kinerja alat ukur *Self Potential* berbasis ESP32 yang mampu mendigitalisasi hasil pengukuran beda potensial listrik secara akurat dan stabil menggunakan ADC ADS1115, serta dilengkapi dengan modul GPS untuk pencatatan koordinat lokasi pengambilan data di lapangan.

E. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai perancangan dan pengujian kinerja alat ukur *Self Potential* berbasis mikrokontroler dan sistem akuisisi data digital.
2. Menyediakan alternatif alat ukur *Self Potential* yang mampu mendigitalisasi hasil pengukuran beda potensial listrik secara lebih sistematis dibandingkan pencatatan manual.
3. Mempermudah proses pengambilan dan pencatatan data *Self Potential* di lapangan, sehingga data yang diperoleh lebih rapi dan mudah dianalisis.
4. Memberikan kontribusi dalam pengembangan alat ukur geofisika, khususnya pada sistem pengukuran *Self Potential* berbasis ADC, untuk keperluan penelitian dan aplikasi lapangan.

BAB II

KAJIAN LITERATUR

A. Tinjauan Pustaka

Metode *Self Potential* (SP) merupakan salah satu teknik pengukuran geofisika pasif yang digunakan untuk mempelajari fenomena kelistrikan alami yang terdapat di bawah permukaan tanah. Tegangan listrik yang terdeteksi berasal dari pergerakan fluida bermuatan listrik, perbedaan konsentrasi ion, serta aktivitas elektrokimia yang terjadi pada lapisan tanah atau batuan [14]. Nilai potensial alami yang dihasilkan oleh metode *Self Potential* (SP) umumnya sangat kecil, seperti yang ditunjukkan oleh penelitian M. A. Jamilludin *et al.* [15] berkisar antara 10 mV hingga 100 mV. Besarnya nilai potensial ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, porositas tanah, serta tingkat konduktivitas dan kelembapan medium [16]. Dalam praktiknya, metode SP banyak dimanfaatkan untuk mendeteksi arah aliran air tanah, kebocoran saluran bawah permukaan, serta zona mineralisasi dan kontaminasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Jardani *et al.* [17] menunjukkan bahwa metode SP dapat digunakan untuk mendeteksi zona kontaminasi air tanah dengan mengukur beda potensial menggunakan elektroda non-polarisasi Cu/CuSO₄. Pengujian dilakukan pada beberapa titik pengukuran dengan jarak antar elektroda lima meter. Hasil pengukuran menunjukkan beda potensial alami antara 150 hingga 700 mV, yang mengindikasikan adanya perbedaan konsentrasi ion akibat proses oksidasi-reduksi di bawah permukaan. Sementara itu, N. Grobbe *et al.* [18] menggunakan metode SP untuk memantau pergerakan fluida panas di daerah vulkanik. Pengukuran dilakukan pada 20 titik dan menghasilkan nilai potensial listrik antara 300 hingga 1200 mV di area dengan aktivitas fluida panas yang tinggi. Kedua penelitian ini membuktikan bahwa metode SP sangat sensitif terhadap pergerakan fluida bermuatan dan dapat memberikan informasi geologi yang akurat tanpa memerlukan pengeboran.

Walaupun efektif, metode SP konvensional masih menghadapi beberapa kendala teknis. Proses pengukuran dilakukan secara manual dengan sepasang elektroda non-polarisasi yang dihubungkan ke multimeter digital untuk mencatat

beda potensial antar titik [19]. Setiap pengukuran harus dilakukan satu per satu dan hasilnya dicatat secara manual, sehingga membutuhkan waktu lama dan berisiko terjadi kesalahan akibat faktor manusia.

Perkembangan teknologi mendorong berbagai penelitian untuk pengembangan sistem pengukuran SP yang lebih modern. A. Priestley *et al.* [20] merancang metode pengukuran *Self Potential* (SP) otomatis yang dilengkapi dengan *array* elektroda dan sistem pencatatan berbasis *data logger*. Sementara itu, Y.Luo *et al.* [21] menggabungkan metode SP dengan data resistivitas tanah untuk memperbaiki hasil interpretasi kondisi bawah permukaan. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dalam sistem SP dapat mengembangkan fungsi pengukuran tegangan menjadi alat pemetaan geologi yang lebih akurat. Namun, penelitian sebelumnya belum banyak yang mengembangkan sistem pengukuran SP otomatis menggunakan modul ADC ADS1115 berpresisi tinggi yang terintegrasi dengan mikrokontroler berbiaya rendah (*low-cost microcontroller*) seperti ESP32 untuk meningkatkan efisiensi dan keakuratan pencatatan data.

Beberapa penelitian serupa masih berfokus pada sistem pencatatan dan interpretasi data, namun belum banyak yang menekankan pada peningkatan sensitivitas pengukuran menggunakan modul ADC ADS1115 dan teknologi berbiaya rendah. Antosia *et al.* [22] melakukan penelitian mengenai perancangan voltmeter otomatis dengan metode pengukuran *diferensial* untuk aplikasi resistivitas DC. ADC ADS1115 merupakan konverter analog ke digital beresolusi 16-bit yang banyak digunakan untuk membaca sinyal tegangan berlevel rendah secara lebih presisi dibandingkan ADC internal mikrokontroler. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi beda potensial listrik hingga orde milivolt melalui pemanfaatan sistem akuisisi data digital. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu membaca beda potensial berorde milivolt secara stabil, meskipun kualitas pembacaan tetap dipengaruhi oleh kondisi pengujian serta adanya gangguan noise lingkungan.

Selain peningkatan akurasi pengukuran, pengembangan sistem *Self Potential* (SP) modern juga diarahkan pada efisiensi dan keberlanjutan operasional di lapangan. Pemanfaatan modul *Global Positioning System* (GPS) terbukti efektif

dalam memberikan data koordinat yang akurat pada setiap titik pengukuran, sehingga memudahkan analisis spasial dan pemetaan geologi [23]. Teknologi ini banyak digunakan pada sistem pemantauan geofisika karena mampu melakukan pelacakan lokasi secara *real time* dan terintegrasi langsung dengan sistem akuisisi data [24]. Di sisi lain, penggunaan panel surya sebagai sumber energi menjadi solusi berkelanjutan untuk mendukung operasional sistem pengukuran di lapangan yang berada jauh dari jaringan listrik. Penelitian oleh H. Kusnadi, dan T. Raharjo [25] menunjukkan bahwa sistem berbasis tenaga surya mampu mempertahankan kontinuitas pengukuran dengan konsumsi daya yang rendah. Integrasi modul GPS dan panel surya pada sistem pengukuran SP diharapkan dapat menghasilkan sistem yang mandiri, hemat energi, serta mampu beroperasi secara berkelanjutan dalam pemantauan kondisi bawah permukaan.

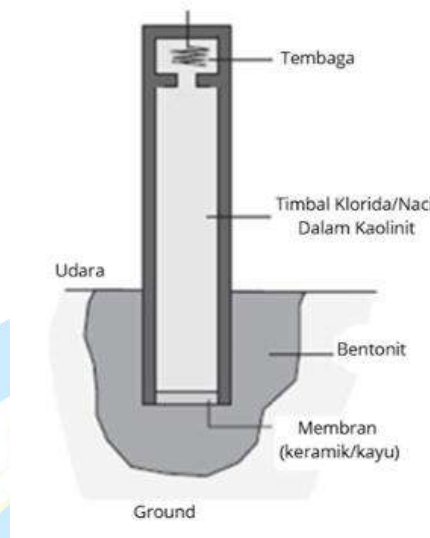
B. Landasan Teori

1. Porouspot

Porouspot merupakan elektroda non-polarisasi yang digunakan pada metode *Self Potential (SP)* untuk mendeteksi beda potensial alami di permukaan tanah. Elektroda ini berfungsi menjaga kestabilan tegangan agar hasil pengukuran tidak dipengaruhi oleh reaksi kimia tambahan di sekitar elektroda [26]. Dengan adanya porouspot, tegangan yang terbaca menjadi lebih stabil dan akurat karena potensi gangguan dari lingkungan dapat diminimalkan. Prinsip kerjanya adalah dengan membandingkan beda potensial antara dua elektroda Cu/CuSO₄ yang ditanam pada titik berbeda di permukaan tanah [27]. Sebelum digunakan, kedua elektroda harus dikalibrasi terlebih dahulu dengan cara menempelkan keduanya untuk memastikan nilai perbedaan potensial tidak melebihi 2 mV agar pembacaan tetap presisi [28].

Struktur porouspot ditunjukkan pada Gambar 1, terdiri atas pipa PVC yang diisi larutan CuSO₄ jenuh dengan batang tembaga murni (Cu) sebagai terminal utama. Ujung bawah elektroda dilapisi campuran pasir dan gipsum yang berfungsi menjaga kontak antara larutan elektrolit dan tanah agar tetap stabil. Desain tersebut memastikan bahwa pengukuran potensial tidak terganggu oleh perubahan

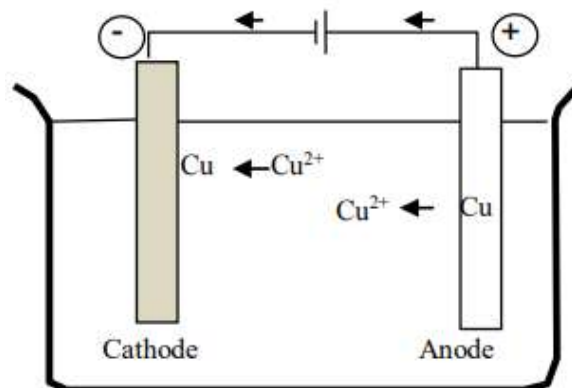
kelembapan tanah maupun resistansi kontak, sehingga porouspot mampu memberikan hasil yang konsisten selama proses pengukuran di lapangan.



Gambar 1. Elektroda Non-Polarisasi
(Sumber : [8])

2. Rangkaian pengukuran *Self Potential* (SP)

Rangkaian pengukuran *Self Potential* (SP) menggunakan sistem *fixed base*, yaitu metode pengukuran beda potensial antara dua elektroda non-polarisasi yang ditempatkan di permukaan tanah. Salah satu elektroda berfungsi sebagai *base* (tetap), sedangkan elektroda lainnya berperan sebagai *rover* (bergerak) yang berpindah di beberapa titik pengukuran sepanjang lintasan. Prinsip pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar 2, di mana setiap pasangan elektroda menghasilkan beda potensial (ΔV) yang merepresentasikan variasi medan listrik alami akibat adanya perbedaan aliran fluida bermuatan atau konduktivitas bawah permukaan tanah [29].

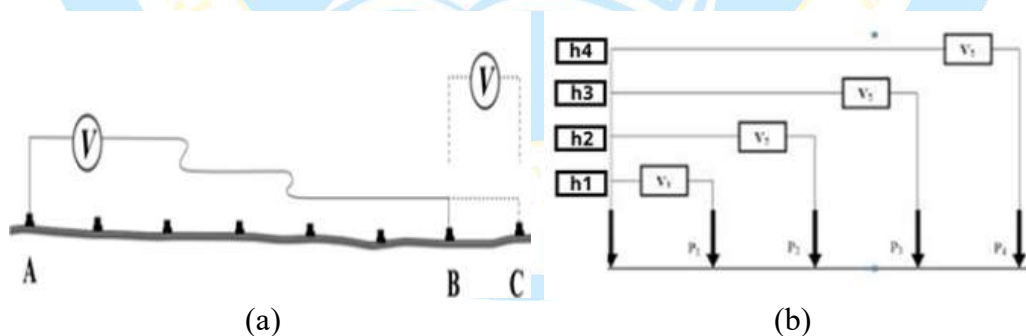


Gambar 2. Diagram prinsip dasar untuk pengukuran *Self Potensial*
(Sumber [29])

3. Ilustrasi Arah Pengukuran *Self Potential* (SP)

Metode *Self Potential* (SP) memiliki dua arah utama pengukuran, yaitu horizontal dan vertikal, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Pada pengukuran horizontal (Gambar 3a), elektroda non-polarisasi Cu/CuSO₄ ditempatkan sejajar di permukaan tanah dengan jarak tertentu di antara kedua titik pengukuran. Tujuannya adalah untuk memperoleh distribusi potensial listrik secara lateral di sepanjang lintasan pengamatan. Nilai beda potensial yang dihasilkan menunjukkan variasi konduktivitas dan aliran fluida bawah permukaan secara mendatar. Metode ini umum digunakan untuk mendeteksi arah aliran air tanah, zona rekahan, serta indikasi kebocoran bawah tanah karena mampu memberikan gambaran perubahan potensial dari satu titik ke titik lainnya secara horizontal [19].

Sementara itu, pengukuran vertikal (Gambar 3b) dilakukan dengan menempatkan satu elektroda di permukaan tanah dan elektroda lainnya ditanam secara bertahap pada kedalaman berbeda. Arah pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui perubahan potensial terhadap kedalaman tanah, yang berhubungan dengan lapisan jenuh air, variasi kelembapan, maupun zona mineralisasi. Nilai potensial yang diukur pada setiap kedalaman memberikan informasi tentang karakteristik fisik dan elektrokimia lapisan tanah secara vertikal [16].



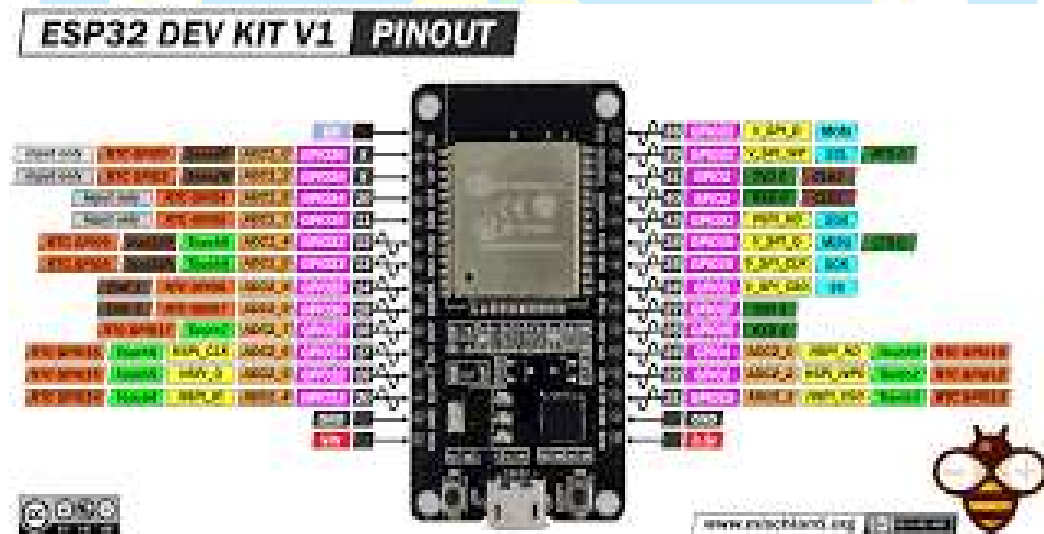
Gambar 3. Ilustrasi Pengukuran *Self Potensial* Horizontal (a) dan Vertikal (b)

4. ESP32

Mikrokontroler merupakan sistem mikroprosesor kompak yang terintegrasi dalam satu chip, terdiri atas unit pemroses pusat (CPU), memori, dan antarmuka input/output (I/O) yang terhubung secara internal [30]. Berbeda dengan

mikroprosesor konvensional yang memerlukan perangkat tambahan eksternal, mikrokontroler menyediakan solusi komputasi mandiri yang efisien dan hemat daya. Mikrokontroler banyak digunakan pada sistem instrumentasi, otomasi, dan akuisisi data, karena mampu menjalankan fungsi kontrol secara *real-time* dengan stabilitas tinggi dan konsumsi daya rendah [31].

Salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan dalam penelitian dan sistem pengukuran modern adalah ESP32. Perangkat ini dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dikenal memiliki kombinasi performa tinggi, efisiensi energi, serta dukungan komunikasi data yang luas. Menurut M. Babiuch *et al.* [32], ESP32 memiliki prosesor dual-core yang memungkinkan pengolahan data sensor secara paralel. A. Maier *et al.* [33] juga menjelaskan bahwa ESP32 mendukung berbagai protokol komunikasi seperti UART, SPI, dan I²C, sehingga dapat digunakan untuk membaca modul eksternal seperti ADC ADS1115, RTC, dan GPS, tanpa memerlukan koneksi internet.



Gambar 4. ESP32 Dev Module
(Sumber [34])

Kemampuan fleksibel ini membuat ESP32 sangat cocok digunakan sebagai pengendali utama dalam sistem pengukuran *Self Potential* (SP). Dalam penelitian ini, ESP32 berfungsi untuk mengakuisisi data beda potensial dari ADS1115, memberikan tanda waktu (*timestamp*) melalui RTC DS3231, serta menyimpan data secara lokal ke dalam SD card. Konfigurasi pinout ESP32 yang digunakan

ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan spesifikasi teknis utamanya dijelaskan pada Tabel 1.

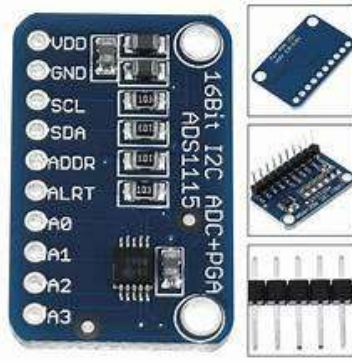
Tabel 1. Spesifikasi ESP32 Dev Module

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Operating Voltage	2.2V to 3.6V DC
2	GPIO	36 Port
3	ADC	14 Port
4	DAC	2 Port
5	Flash Memory	16 Mbyte
6	SRAM	250 Kbyte
7	Clock Speed	Up to 240 MHz
8	Wi-Fi	2.4 GHz
9	Sleep Current	2.4 μ A

5. Modul ADC ADS1115 (*Analog to Digital Converter*)

Modul ADC ADS1115 merupakan perangkat konverter analog ke digital (ADC) dengan resolusi tinggi 16-bit yang digunakan untuk membaca sinyal tegangan sangat kecil dari elektroda *Self Potential* (SP). ADC ini berfungsi mengubah sinyal analog menjadi data digital agar dapat diproses oleh mikrokontroler ESP32. Modul ADC ADS1115 memiliki empat kanal input (A0–A3) yang dapat dikonfigurasi dalam mode *single-ended* maupun *differential*, dengan komunikasi data melalui antarmuka I²C [35].

Selain itu, fitur utama dari modul ADC ADS1115 adalah kemampuannya membaca sinyal secara *differential*, yaitu membandingkan tegangan antara dua kanal input untuk menghasilkan nilai beda potensial (ΔV) yang lebih akurat dan bebas dari noise. Dalam penelitian ini, konfigurasi *differential* digunakan untuk membaca tegangan antara dua elektroda Cu/CuSO₄. Tegangan dengan orde milivolt yang diperoleh dari elektroda diubah menjadi data digital beresolusi tinggi oleh Modul ADC ADS1115 sebelum diteruskan ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses dan disimpan [36]. Konfigurasi pin modul ADC ADS1115 yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan spesifikasi teknis utamanya dijelaskan pada Tabel 2.



Gambar 5. Modul ADC ADS1115
(Sumber : [37])

Tabel 2. Spesifikasi Modul ADC ADS1115

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Resolusi	16-bit
2	Antarmuka	I2C
3	Catu Daya	2.0V hingga 5.5V
4	Laju Sampel	8 hingga 860 Sampel/Detik
5	Input Analog	Empat input <i>single-ended</i> atau dua input <i>diferensial</i>
6	Konsumsi Daya	Rendah, 150 μ A dalam mode kontinu

6. Modul GPS NEO-7

Modul GPS *NEO-7* merupakan perangkat penerima sinyal satelit yang berfungsi untuk menentukan koordinat geografis suatu titik pengukuran dalam bentuk lintang (*latitude*), bujur (*longitude*), dan ketinggian (*altitude*). Prinsip kerja modul GPS ini didasarkan pada metode *trilaterasi*, yaitu perhitungan posisi berdasarkan jarak antara penerima sinyal (*receiver*) dengan beberapa satelit GPS yang mengorbit bumi [38]. Dalam proses penentuan posisi, setidaknya tiga satelit diperlukan untuk memperoleh data dua dimensi (lintang dan bujur), sedangkan empat satelit atau lebih digunakan untuk menghitung posisi tiga dimensi (termasuk ketinggian). Data koordinat yang diterima dari satelit kemudian dikonversi ke dalam format digital yang dapat diolah oleh mikrokontroler.

Dalam sistem pengukuran *Self Potential (SP)* ini, modul GPS *NEO-7* digunakan untuk merekam koordinat setiap titik pengukuran secara otomatis. Dengan demikian, setiap data beda potensial yang diperoleh dari elektroda SP dapat dilengkapi dengan informasi posisi geografisnya secara spasial dan waktu yang akurat. Modul ini juga terintegrasi dengan pustaka *TimeLib*, yang berfungsi untuk

menyinkronkan data waktu pengukuran dengan waktu global dari satelit, sehingga setiap pembacaan nilai potensial dapat ditandai dengan waktu aktual secara presisi.

Modul GPS *NEO-7* menggunakan antarmuka komunikasi *UART* (TX dan RX), serta beroperasi pada tegangan 3.3–5 V DC dengan konsumsi arus sekitar ± 45 mA. Modul ini dilengkapi dengan antena keramik bawaan berukuran 25×25 mm yang meningkatkan sensitivitas penerimaan sinyal satelit. Bentuk fisiknya diperlihatkan pada Gambar 6, sedangkan spesifikasi lengkap modul GPS *NEO-7* ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 6. Modul GPS *NEO-7*
(Sumber : [39])

Tabel 3. Spesifikasi Modul GPS *NEO-7*

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Chipset	u-blox <i>NEO-7</i>
2	Antarmuka Komunikasi	UART (TX, RX)
3	Tegangan Operasi	3.3 – 5 V DC
4	Konsumsi Arus	± 45 mA
5	Frekuensi Sinyal	1575.42 MHz (L1 Band)
6	Jumlah Kanal	22 tracking / 50 acquisition
7	Akurasi Posisi	± 2.5 meter (CEP 50%)
8	Update Rate	1 Hz (default), hingga 5 Hz
9	Penyimpanan Konfigurasi	EEPROM (HK24C32 4Kb)
10	Antena	Antena keramik 25 x 25mm bawaan

7. Modul SD Card

Modul SD Card berfungsi sebagai media penyimpanan data berbasis memori *flash* yang digunakan untuk merekam dan menyimpan hasil pembacaan dari sistem mikrokontroler. Modul ini bekerja menggunakan antarmuka komunikasi SPI (Serial Peripheral Interface) yang terhubung langsung dengan mikrokontroler ESP32 melalui pin MOSI, MISO, SCK, dan CS. Dengan sistem

komunikasi ini, proses transfer data antara modul dan mikrokontroler dapat berlangsung secara cepat dan efisien [40].

Modul SD Card beroperasi pada tegangan 3,3 V DC dengan konsumsi arus rendah sekitar 80 mA, serta dilengkapi regulator tegangan *onboard* (AMS1117) untuk menjaga kestabilan catu daya saat digunakan bersama mikrokontroler ESP32. Modul ini mendukung format sistem file FAT16 dan FAT32, dengan kapasitas penyimpanan hingga 32 GB, sehingga mampu menampung data dalam jumlah besar untuk keperluan pencatatan jangka panjang (*data logging*). Data yang direkam dapat disimpan dalam format teks atau CSV agar mudah dibaca dan diolah kembali pada tahap analisis [41]. Gambar 7 memperlihatkan bentuk fisik modul SD Card yang digunakan, sedangkan Tabel 4 menampilkan spesifikasi teknis utamanya.



Gambar 7. Modul SD Card
(Sumber : [42])

Tabel 4. Spesifikasi Modul SD Card

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Tegangan Operasi	3,3 V DC
2	Konsumsi Arus	Hingga 80 mA
3	Antarmuka Komunikasi	SPI (MOSI, MISO, SCK, CS)
4	Regulator Tegangan	± AMS1117 Onboard
5	Sistem File	FAT16 / FAT32
6	Kapasitas Penyimpanan	Hingga 32 GB

8. Modul *step-down*

Modul *step-down converter* atau *buck converter* adalah rangkaian elektronika daya yang berfungsi menurunkan tegangan DC dari nilai yang lebih tinggi menjadi nilai yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Modul ini bekerja berdasarkan prinsip *switching* menggunakan komponen utama berupa transistor (MOSFET), dioda, induktor, dan kapasitor yang beroperasi secara bergantian untuk

mengatur aliran energi listrik. Tegangan keluaran yang dihasilkan ditentukan oleh rasio *duty cycle* sinyal PWM, sehingga dapat dikontrol sesuai kebutuhan beban. Dibandingkan dengan regulator linear, *buck converter* lebih efisien karena energi tidak dibuang dalam bentuk panas, melainkan diubah dan disimpan secara sementara di induktor. Teknologi ini banyak digunakan pada sistem mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino untuk menyediakan catu daya stabil sebesar 3,3 V atau 5 V dari sumber tegangan yang lebih tinggi, misalnya 12 V DC [43]. Gambar 8 memperlihatkan bentuk fisik Modul *Step Down* yang digunakan, sedangkan Tabel 5 menampilkan spesifikasi teknis utamanya.



Gambar 8. Modul *Step Down*
(Sumber : <https://tinyurl.com/8ae96m9z>)

Tabel 5. Spesifikasi Modul *Step Down*

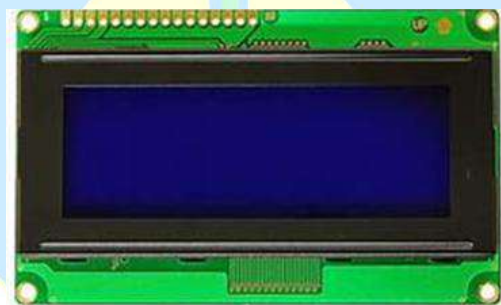
No	Spesifikasi	Keterangan
1	Tegangan Input	4,5 V – 40 V DC
2	Tegangan Output	1.25 V – 37 V DC (dapat diatur)
3	Arus Output Maksimum	2 A (maks. 3 A dengan pendinginan)
4	Efisiensi Konversi	Hingga 92 %
5	Frekuensi Switching	150 kHz
6	Regulator IC Utama	LM2596S DC–DC Converter
7	Display	3-digit 7-segment voltmeter
8	Proteksi	Overheating & overcurrent protection

9. LCD 20x4

Liquid Crystal Display (LCD) 20x4 merupakan jenis tampilan berbasis kristal cair yang memiliki 20 kolom dan 4 baris karakter, sehingga mampu menampilkan hingga 80 karakter sekaligus. Modul ini bekerja dengan prinsip perubahan orientasi molekul kristal cair akibat pengaruh medan listrik, yang mengatur transmisi cahaya untuk membentuk karakter pada layar. LCD 20x4 banyak digunakan dalam sistem mikrokontroler untuk menampilkan data sensor,

status sistem, maupun antarmuka pengguna (user interface) secara real-time. Modul ini biasanya menggunakan driver kontroler HD44780 yang berfungsi sebagai pengatur komunikasi antara mikrokontroler dan panel tampilan. Komunikasi dapat dilakukan melalui mode 4-bit atau 8-bit paralel, di mana data dikirimkan dalam bentuk kode ASCII untuk menampilkan huruf, angka, atau simbol pada layar [44].

Tegangan kerja LCD 20x4 umumnya 5 V DC, dengan arus konsumsi rendah sekitar 2–3 mA, sehingga efisien untuk sistem tertanam seperti Arduino, ESP32, dan Raspberry Pi. LCD ini juga dilengkapi potensiometer kontras untuk menyesuaikan kecerahan tampilan, serta lampu latar (backlight) berbasis LED agar tetap terlihat jelas pada kondisi pencahayaan rendah. Dalam aplikasi industri maupun penelitian, LCD 20x4 sering digunakan sebagai media tampilan hasil pengukuran tegangan, arus, suhu, kelembapan, maupun parameter fisis lainnya karena kemampuannya menampilkan data dengan stabil dan mudah dibaca [45]. Gambar 9 memperlihatkan bentuk fisik LCD 20x4 yang digunakan, sedangkan Tabel 6 menampilkan spesifikasi teknis utamanya.



Gambar 9. LCD 20x4
(Sumber : <https://tinyurl.com/msewde3x>)

Tabel 6. Spesifikasi LCD 20x4

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Tipe Tampilan	Alfanumerik (20 kolom × 4 baris / total 80 karakter)
2	IC Pengendali	HD44780 atau kompatibel
3	Tegangan Operasi	5 V DC
4	Arus Operasi	± 2–3 mA (tanpa backlight)
5	Antarmuka	Paralel 4-bit / 8-bit (opsional I ² C)
6	Backlight	LED putih dengan pengatur kecerahan
7	Pengatur Kontras	Potensiometer (pin V0)
8	Aplikasi Umum	Tampilan data sensor dan status sistem
9	Kompatibilitas	Arduino, ESP32, Raspberry Pi, STM32

10. Panel Surya

Panel surya merupakan komponen utama dalam sistem energi terbarukan yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Proses ini terjadi melalui efek fotovoltaiik, yaitu fenomena ketika sel surya (*solar cell*) menghasilkan arus listrik saat terkena radiasi cahaya matahari. Energi listrik yang dihasilkan bersifat arus searah (DC) dan dapat digunakan secara langsung atau disimpan melalui sistem penyimpanan energi [46].

Panel surya biasanya terdiri dari beberapa sel silikon yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk mencapai tegangan serta arus keluaran yang diinginkan. Efisiensi konversi energi pada panel surya bergantung pada bahan semikonduktor yang digunakan, intensitas cahaya, dan suhu lingkungan. Secara umum, panel surya digunakan karena sifatnya yang ramah lingkungan, mudah dipasang, dan mampu menyediakan energi listrik secara mandiri [47]. Bentuk fisiknya diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Panel Surya
(Sumber [48])

11. Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge controller PWM (Pulse Width Modulation) berfungsi untuk mengatur arus dan tegangan dari panel surya sebelum masuk ke baterai agar proses pengisian daya berlangsung stabil dan aman. Perangkat ini mencegah terjadinya pengisian berlebih (*overcharge*) maupun pengosongan berlebih (*over-discharge*) yang dapat merusak baterai. Jenis *PWM* bekerja dengan cara mengatur lebar pulsa tegangan dari panel surya menuju baterai secara periodik, sehingga pengisian dapat

disesuaikan dengan kondisi baterai tanpa menyebabkan lonjakan arus yang berlebihan [49]. Bentuk fisiknya diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 11. *Solar Charge Controller*
(Sumber [50])

12. Aki

Aki atau baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Energi yang tersimpan dapat digunakan sebagai sumber daya cadangan ketika intensitas cahaya matahari berkurang atau pada malam hari. Jenis aki yang umum digunakan dalam sistem tenaga surya adalah aki timbal-asam (*lead-acid*), tergantung kebutuhan dan kapasitas sistem.

Aki timbal-asam umumnya digunakan karena biaya yang lebih ekonomis dan mudah diperoleh, meskipun memiliki bobot lebih berat. Sedangkan aki lithium-ion memiliki efisiensi pengisian lebih tinggi, umur pakai lebih panjang, dan bobot lebih ringan. Kapasitas baterai adalah jumlah ampere jam ($Ah = \text{kuat arus} / \text{Ampere} \times \text{waktu/hour}$), artinya baterai dapat memberikan atau menyuplai sejumlah isinya secara rata-rata sebelum tiap selnya menyentuh tegangan atau voltase turun (drop voltase). yaitu sebesar 1,75 V [51]. Bentuk fisiknya diperlihatkan pada Gambar 12.



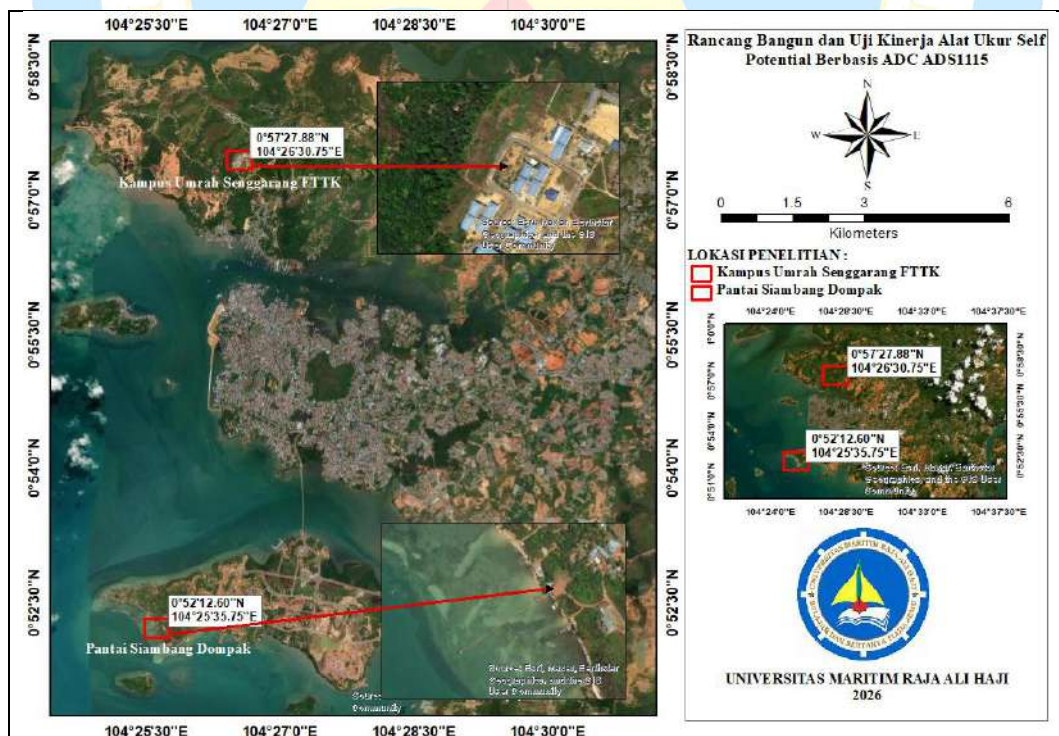
Gambar 12. Aki
(Sumber : [52])

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Desember hingga Maret 2025 di dua lokasi yang mewakili jenis tanah berbeda di wilayah Tanjungpinang, Kepulauan Riau. Lokasi pertama berada di Kampus UMRAH Senggarang dengan karakteristik tanah bauksit, sedangkan lokasi kedua terletak di Pantai Tanjung Siambang, Pulau Dompak, yang memiliki tanah pesisir berpasir. Pemilihan kedua lokasi ini bertujuan untuk menguji kinerja alat pengukuran *Self Potential* (SP) berbasis ESP32 terhadap perbedaan kondisi tanah. Perbedaan karakteristik tanah tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan alat dalam membaca beda potensial listrik secara akurat dan stabil pada kondisi media tanah yang berbeda. Sebelum dilakukan pengujian lapangan, alat dikalibrasi di Laboratorium Fakultas Teknik UMRAH dalam kondisi terkontrol untuk memastikan akurasi dan kestabilan pembacaan sensor. Adapun lokasi penelitian ditunjukkan dalam Gambar 13.



Gambar 13. Lokasi Penelitian

B. Bahan dan Alat

Penelitian ini membutuhkan alat dan bahan yang digunakan dalam proses pembuatan alat sampai dengan pengambilan data. Alat dan bahan yang digunakan ditunjukkan dalam Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 7. Alat yang digunakan Penelitian

Nama Bahan	Kegunaan
Multimeter Digital	Digunakan untuk kalibrasi dan pengecekan tegangan pada rangkaian alat
Solder Kit	Untuk menyambung komponen elektronik pada papan PCB
Obeng & Tang Kombinasi	Membantu proses perakitan mekanik dan pemasangan komponen
Bor Cordless	Digunakan saat pembuatan lubang panel atau penempatan konektor alat
Gerinda Mini / GWS060	Untuk pemotongan material panel dan penyesuaian dudukan komponen

Tabel 8. Bahan yang digunakan Penelitian

Nama Bahan	Kegunaan
Mikrokontroler ESP32	Sebagai pusat kendali utama yang memproses data hasil pengukuran dan mengatur komunikasi antar modul
Modul ADC ADS1115 (16-bit)	Digunakan untuk membaca sinyal beda potensial dari elektroda SP dengan resolusi tinggi agar hasil pengukuran lebih akurat
Elektroda Cu/CuSO ₄ (non-polarisasi)	Berfungsi sebagai sensor utama untuk mendeteksi beda potensial alami di permukaan tanah
Modul GPS NEO-7	Mencatat titik koordinat setiap pengukuran agar data memiliki informasi lokasi yang akurat
Solar Charge Controller (SCC)	Mengatur proses pengisian energi dari panel surya ke aki agar pengisian berlangsung aman dan menjaga kestabilan tegangan suplai sistem.
Modul MicroSD Card	Menyimpan data hasil pengukuran dalam format digital untuk keperluan analisis
Saklar	Digunakan untuk menghubungkan dan memutuskan aliran arus listrik pada sistem secara manual untuk keamanan dan efisiensi daya.
Panel Surya 60 WP	Sebagai sumber daya utama untuk mengisi aki dan menyediakan energi bagi sistem
Aki 12 V 8 Ah	Menyimpan energi dari panel surya untuk memastikan alat tetap beroperasi secara berkelanjutan
Ground Rod	Sebagai batang logam yang dihubungkan ke elektroda untuk memastikan kontak tanah yang stabil

Nama Bahan	Kegunaan
Cairan CuSO ₄ (<i>Copper Sulfate</i>)	Digunakan untuk menjaga kestabilan potensial elektroda Cu/CuSO ₄ agar hasil pengukuran tidak terpengaruh oksidasi.
Box Panel dan PCB	Melindungi rangkaian alat dari gangguan luar dan menjadi tempat perakitan sistem elektronik
LCD 20x4	Menampilkan data hasil pengukuran, status sistem, serta pesan informasi secara real-time.

C. Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan secara bertahap dimulai dari studi literatur hingga diperoleh hasil pengujian dan kesimpulan penelitian. Setiap proses dilakukan untuk memastikan alat ukur *Self Potential* (SP) yang dirancang dapat bekerja dengan baik, stabil, dan mampu menghasilkan data pengukuran yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 14.

Penelitian diawali dengan studi literatur, yaitu proses pengumpulan dan mempelajari berbagai referensi yang berkaitan dengan metode *Self Potential* (SP), sistem akuisisi data, elektroda poruspot, ADC resolusi tinggi, serta mikrokontroler ESP32. Studi literatur dilakukan sebagai dasar dalam memahami prinsip kerja sistem, metode pengukuran, serta menentukan pendekatan yang digunakan selama penelitian berlangsung. Selain itu, kajian literatur juga digunakan untuk mengetahui perkembangan penelitian sebelumnya sehingga dapat menjadi acuan dalam proses perancangan alat.

Setelah itu dilakukan identifikasi masalah untuk menentukan kebutuhan sistem dan permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian. Pada bagian ini ditentukan spesifikasi alat, metode pengukuran, konfigurasi elektroda, sistem penyimpanan data, dan kebutuhan catu daya yang digunakan pada alat ukur *Self Potential*. Proses identifikasi masalah dilakukan agar alat yang dirancang sesuai dengan kebutuhan pengukuran di lapangan serta mampu bekerja secara optimal selama proses penelitian.

Selanjutnya dilakukan uji fungsional awal untuk memastikan komponen dasar yang digunakan dapat bekerja dengan baik sebelum masuk ke proses perancangan sistem. Pengujian ini dilakukan terhadap beberapa komponen utama untuk mengetahui kondisi awal perangkat yang akan digunakan, seperti komunikasi

modul, pembacaan sensor, serta kestabilan catu daya. Pengujian awal ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pada tahap perancangan dan integrasi sistem.

Proses berikutnya yaitu perancangan sistem yang terdiri dari perancangan *hardware*, *electrical*, dan *firmware*. Perancangan *hardware* dilakukan dengan menentukan serta menyusun komponen utama alat sesuai kebutuhan sistem. Perancangan *electrical* dilakukan pada jalur koneksi antar komponen, konfigurasi elektroda, dan sistem distribusi daya agar alat dapat bekerja dengan stabil. Sementara itu, perancangan *firmware* dilakukan dengan membuat program untuk proses pembacaan data, pengolahan data, tampilan informasi, dan penyimpanan data secara otomatis ke media penyimpanan.

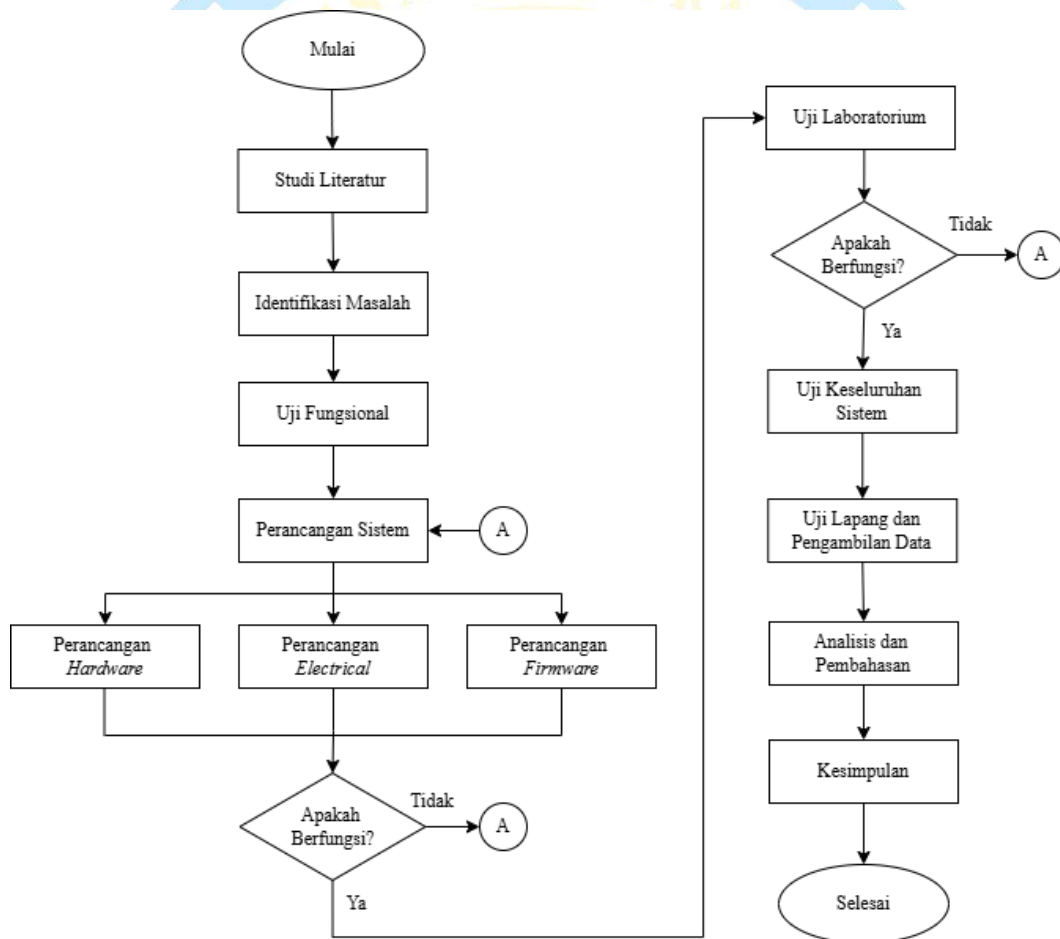
Setelah proses perancangan selesai, dilakukan pengujian untuk mengetahui apakah sistem telah berfungsi dengan baik. Jika sistem belum bekerja sesuai yang diharapkan, maka dilakukan evaluasi dan perbaikan dengan kembali ke proses perancangan sistem hingga alat dapat berfungsi dengan baik. Proses ini dilakukan secara berulang agar sistem yang dirancang memiliki performa yang stabil dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Apabila sistem telah berfungsi, penelitian dilanjutkan pada tahap uji laboratorium yang dilakukan dalam kondisi terkontrol untuk mengevaluasi kinerja alat. Pengujian meliputi kalibrasi sensor, pengujian elektroda porouspot, kestabilan dan akurasi pembacaan data, kecepatan respon sistem, serta estimasi kebutuhan daya perangkat selama pengoperasian di lapangan. Jika hasil pengujian belum sesuai dengan perancangan, maka dilakukan perbaikan dan penyesuaian kembali pada sistem. Setelah seluruh pengujian laboratorium selesai dan alat dinyatakan bekerja dengan baik, dilakukan uji keseluruhan sistem untuk memastikan setiap komponen dapat beroperasi secara terintegrasi selama proses pengukuran berlangsung.

Selanjutnya dilakukan uji lapang dan pengambilan data. Pada proses ini alat ukur *Self Potential* digunakan secara langsung pada lokasi pengukuran untuk memperoleh data beda potensial dalam satuan milivolt. Pengambilan data dilakukan menggunakan elektroda porouspot yang telah dirancang dan diuji sebelumnya. Data hasil pengukuran kemudian disimpan untuk proses analisis lebih lanjut. Data yang diperoleh kemudian diolah pada bagian analisis dan pembahasan

untuk mengetahui hasil pengukuran serta performa alat yang telah dirancang. Proses ini mencakup pengolahan data, visualisasi data, dan interpretasi hasil pengukuran untuk melihat karakteristik data *Self Potential* yang diperoleh selama penelitian.

Sebagai penutup, disusun kesimpulan berdasarkan keseluruhan hasil penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan mencakup tingkat keberhasilan sistem, kestabilan kinerja alat, serta akurasi pengukuran yang diperoleh. Dengan demikian, seluruh rangkaian penelitian dapat dinyatakan selesai setelah melalui proses pengujian dan evaluasi secara menyeluruh.



Gambar 14. Diagram Alir Prosedur Penelitian

D. Uji Fungsional

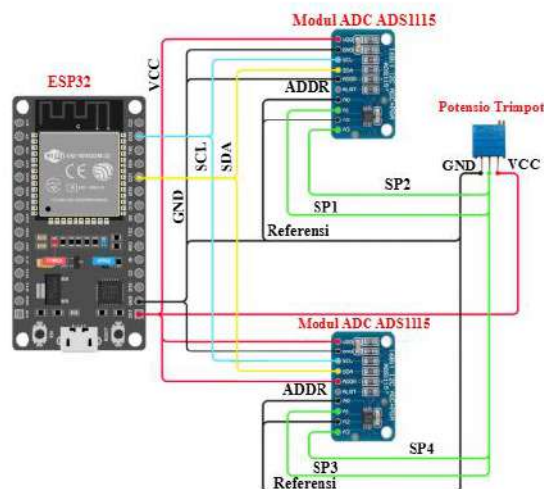
Uji fungsionalitas merupakan proses pengujian yang bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen dalam sistem dapat bekerja sesuai dengan

spesifikasi dan fungsi yang telah dirancang. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perangkat keras dan perangkat lunak agar sistem mampu beroperasi secara optimal serta memiliki integrasi yang baik antar komponen dalam satu kesatuan sistem.

Pengujian dilakukan terhadap ESP32 sebagai mikrokontroler utama, modul ADC ADS1115 untuk pembacaan sinyal analog, modul GPS NEO-7 untuk memperoleh data koordinat, modul SD Card sebagai media penyimpanan data, serta modul LCD 20x4 sebagai tampilan informasi. Setiap komponen diuji untuk memastikan komunikasi dan fungsinya berjalan dengan baik, sehingga sistem mampu menghasilkan data yang akurat, stabil, dan dapat disimpan serta ditampilkan secara *real-time* sesuai kebutuhan penelitian.

a. Modul ADC ADS1115

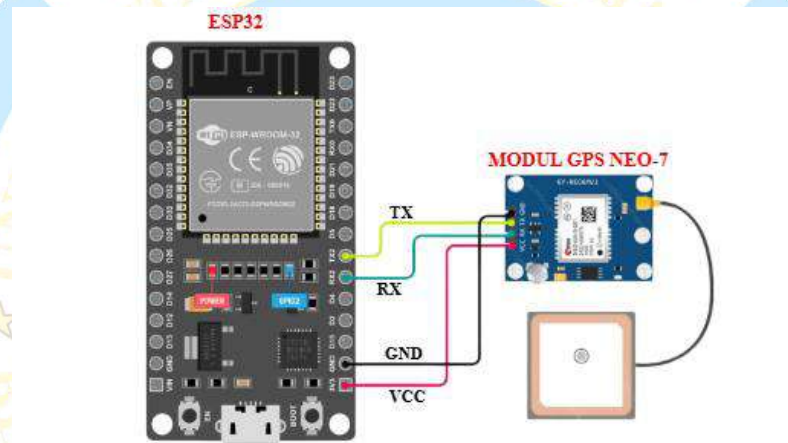
Pengujian Modul ADC ADS1115 dilakukan dengan menghubungkan modul ADC ADS1115 dengan mikrokontroler ESP32 dan diprogram menggunakan *software* Arduino IDE. Konfigurasi pin yang digunakan pada pengujian ini meliputi jalur komunikasi I²C, di mana pin SDA modul ADS1115 dihubungkan ke pin GPIO 21 ESP32, dan pin SCL modul ADS1115 dihubungkan ke pin GPIO 22 ESP32. Pin VCC modul dihubungkan ke 3,3V ESP32, sedangkan pin GND dihubungkan ke GND ESP32. Sumber tegangan uji diberikan melalui terminal input AIN0 dan AIN1 untuk pembacaan *differensial*. Rangkaian uji fungsional modul ADC ADS1115 dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Rangkaian Modul ADC ADS1115

b. Modul GPS NEO-7

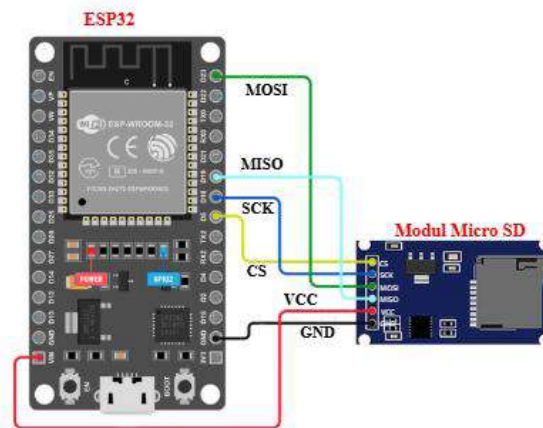
Pengujian modul *GPS NEO-7* dilakukan dengan menghubungkan modul GPS dengan mikrokontroler ESP32 dan diprogram menggunakan *software* Arduino IDE. Konfigurasi pin yang digunakan pada pengujian ini meliputi jalur komunikasi UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), di mana pin TX modul GPS *NEO-7* dihubungkan ke pin GPIO 16 (RX2) pada ESP32, dan pin RX modul GPS dihubungkan ke pin GPIO 17 (TX2) ESP32. Pin VCC modul dihubungkan ke 3,3V ESP32, sedangkan pin GND modul dihubungkan ke GND ESP32. Rangkaian uji fungsional modul *GPS NEO-7* dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Rangkaian Modul GPS *NEO-7*

c. Modul SD Card

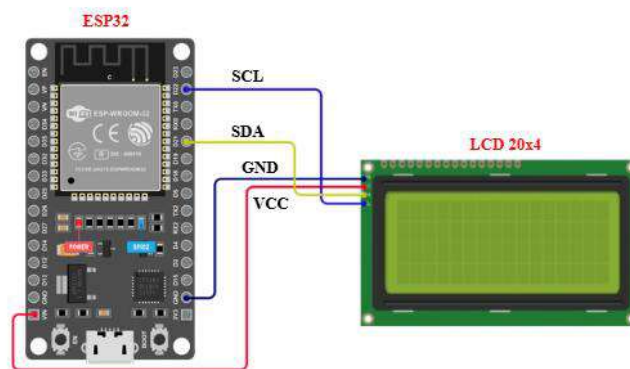
Pengujian modul SD Card dilakukan dengan menghubungkan modul SD Card dengan mikrokontroler ESP32 dan diprogram menggunakan *software* Arduino IDE. Konfigurasi pin yang digunakan pada pengujian ini meliputi jalur komunikasi SPI (*Serial Peripheral Interface*), di mana pin MOSI modul SD Card dihubungkan ke GPIO 23 ESP32, pin MISO dihubungkan ke GPIO 19, pin SCK dihubungkan ke GPIO 18, dan pin CS (*Chip Select*) dihubungkan ke GPIO 5 ESP32. Pin VCC modul dihubungkan ke 3,3V ESP32, sedangkan pin GND dihubungkan ke GND ESP32. Rangkaian uji fungsional modul SD Card dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Rangkain Modul SD Card

d. Modul LCD 20x4

Pengujian modul LCD 20x4 dilakukan dengan menghubungkan modul LCD dengan mikrokontroler ESP32 dan diprogram menggunakan *software* Arduino IDE. Konfigurasi pin yang digunakan pada pengujian ini meliputi jalur komunikasi I²C (*Inter-Integrated Circuit*). Modul LCD 20x4 yang digunakan telah dilengkapi dengan I²C *backpack module*, sehingga hanya memerlukan empat koneksi utama, yaitu: pin SDA dihubungkan ke GPIO 21 ESP32, pin SCL dihubungkan ke GPIO 22 ESP32, pin VCC dihubungkan ke 5V ESP32, dan pin GND dihubungkan ke GND ESP32. Rangkaian uji fungsional modul LCD 20x4 dapat dilihat pada Gambar 18.

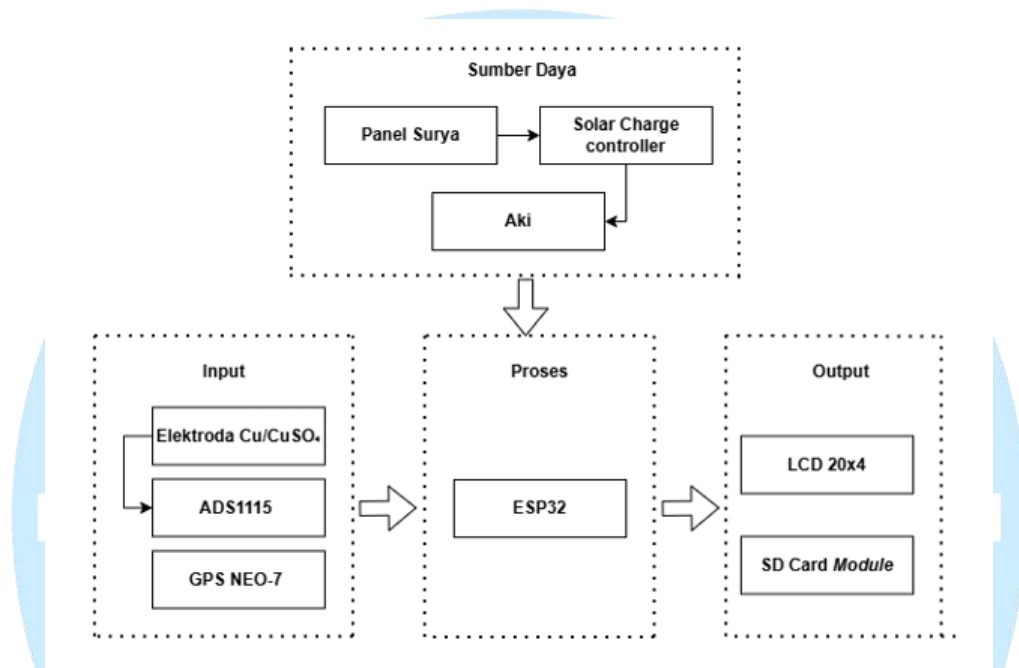


Gambar 18. Rangkaian Modul LCD 20x4

E. Perancangan Sistem

Subbab Perancangan sistem difokuskan untuk memastikan seluruh komponen saling terhubung dan bekerja stabil dalam satu kesatuan. Alur kerja

disusun dalam tiga tahap utama, yaitu input–proses–output: (1) tahap input membaca sinyal beda potensial dari sepasang elektroda non-polarisasi melalui Modul ADC ADS1115 (*mode differensial*) dan koordinat (GPS NEO-7); (2) tahap proses dilakukan oleh ESP32 untuk memvalidasi, memberi penanda waktu/posisi, dan menyiapkan data; (3) tahap output menyimpan data ke *SD Card* serta menampilkan informasi ringkas di LCD 20x4. Diagram Blok Perancangan Sistem dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Diagram Blok Perancangan Sistem

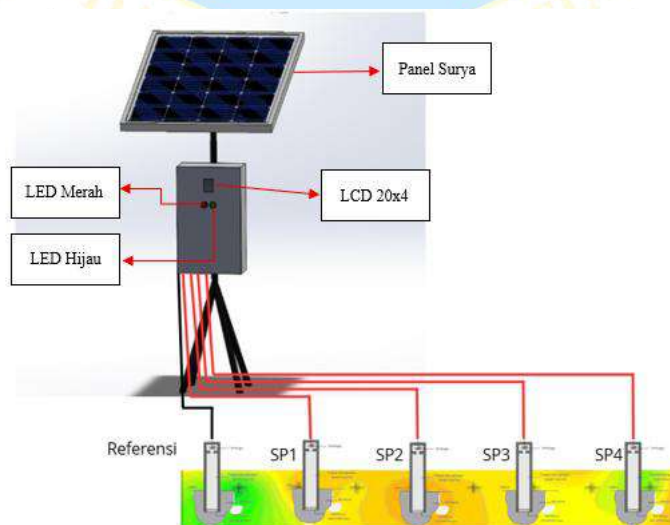
Tahap perancangan sistem dilakukan untuk memastikan setiap komponen dapat terintegrasi dengan baik dan berfungsi sesuai perannya. Proses ini terdiri atas tiga bagian utama, yaitu *hardware*, *electrical*, dan *firmware*. Perancangan pada bagian *hardware* difokuskan pada pembuatan rancangan fisik serta desain tata letak komponen secara tiga dimensi agar mudah diterapkan pada prototipe. Pada bagian *electrical*, kegiatan difokuskan pada penyusunan skema rangkaian serta pengaturan koneksi antar komponen agar sistem dapat bekerja secara stabil. Sementara itu, pada bagian *firmware*, perancangan diarahkan pada proses pemrograman yang berfungsi untuk mengatur alur kerja sistem, membaca data sensor, dan menyimpan hasil pembacaan secara otomatis. Penjelasan lebih detail mengenai masing-masing bagian akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

1. Perancangan *Hardware*

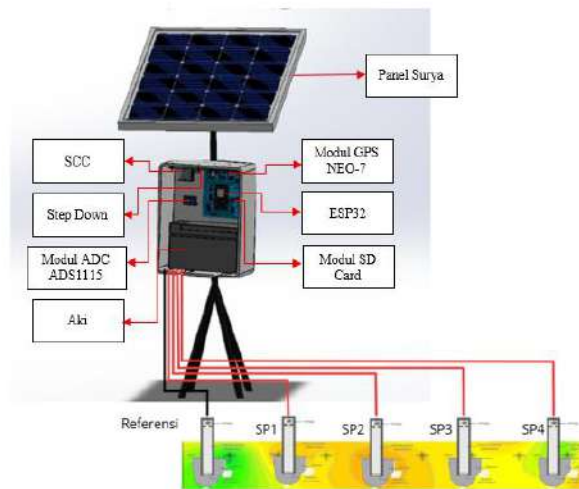
Perancangan *hardware* pada penelitian ini mencakup proses perancangan sistem secara fisik beserta struktur penopang yang digunakan untuk mendukung kinerja alat. Desain alat dibuat menggunakan rangka penyangga berbentuk tripod yang berfungsi untuk menopang keseluruhan sistem dan menjaga kestabilan posisi alat saat digunakan di lapangan. Struktur penyangga ini terbuat dari pipa logam agar memiliki kekuatan yang baik dan tahan terhadap kondisi lingkungan luar.

Pada bagian atas rangka dipasang panel surya monokristalin yang berfungsi sebagai sumber utama energi listrik bagi sistem. Panel surya dihubungkan dengan *charge controller* yang ditempatkan di dalam box kontrol sebagai pusat distribusi daya ke seluruh komponen alat. Box ini juga berfungsi melindungi rangkaian elektronik seperti mikrokontroler ESP32, Modul ADC ADS1115, modul GPS NEO-7, Modul Step Down, SD Card, dan LCD 20x4 dari paparan sinar matahari, debu, serta kelembapan.

Posisi panel surya dirancang miring agar mampu menerima intensitas cahaya matahari secara optimal sepanjang hari. Sedangkan pada sisi box, dipasang indikator LED sebagai penanda status operasi alat, seperti daya aktif dan proses penyimpanan data. Dengan desain seperti ini, alat dapat berdiri secara kokoh dan beroperasi mandiri di lapangan tanpa memerlukan sumber listrik eksternal. Perancangan desain 3D sistem ditunjukkan pada Gambar 20, sedangkan Desain 3D Peletakan Komponen di dalam Box Panel ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 20. Desain 3D Perancangan Alat Keseluruhan



Gambar 21. Desain 3D Peletakan Komponen di dalam Box Panel

2. Perancangan *Electrical*

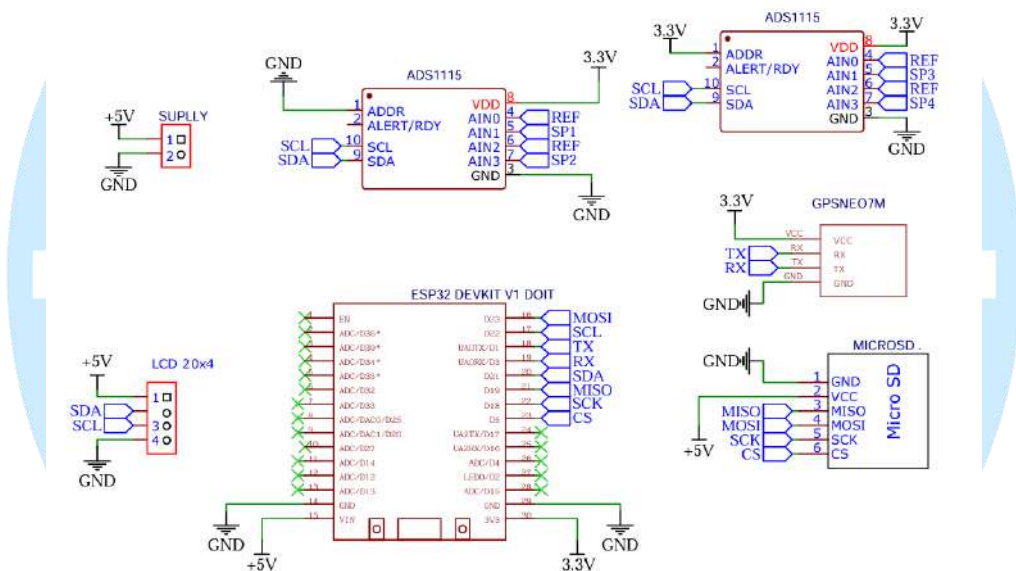
Perancangan *electrical* berfokus pada penyusunan dan pengaturan koneksi antar komponen elektronik agar sistem dapat bekerja dengan stabil dan efisien. Panel surya berfungsi sebagai sumber daya utama yang menghasilkan energi listrik saat menerima cahaya matahari. Energi tersebut dialirkan melalui *charge controller* untuk mengatur tegangan pengisian sebelum disalurkan ke aki sebagai penyimpanan energi. Dari aki, daya listrik kemudian digunakan untuk menyalakan seluruh rangkaian elektronik alat.

Pada bagian sistem pengukuran, sinyal masukan dari elektroda non-polarisasi dibaca oleh Modul ADC ADS1115 yang berfungsi sebagai konverter analog ke digital (ADC) dengan resolusi 16-bit. Modul ini dikonfigurasi dalam mode diferensial agar hasil pengukuran lebih akurat dan minim gangguan *noise*. Nilai beda potensial yang diperoleh selanjutnya dikirim ke mikrokontroler ESP32, yang berperan sebagai pusat pemrosesan data. ESP32 juga menerima informasi lokasi dan waktu dari modul GPS *NEO-7* melalui jalur komunikasi UART, sehingga setiap data pengukuran dapat memiliki penanda posisi yang spesifik.

Data hasil pemrosesan kemudian disimpan secara otomatis ke modul SD Card menggunakan komunikasi SPI (*Serial Peripheral Interface*). Modul ini berfungsi sebagai media penyimpanan permanen untuk mencatat seluruh hasil

pengukuran dalam format teks atau CSV. Selain itu, layar LCD 20x4 digunakan untuk menampilkan nilai hasil pembacaan serta status operasi sistem secara real-time, sehingga pengguna dapat memantau proses kerja alat langsung di lapangan.

Rangkaian kelistrikan alat dirancang menggunakan sumber daya kerja sebesar 3,3 V hingga 5 V DC yang disesuaikan dengan kebutuhan setiap modul. Jalur komunikasi antar komponen diatur agar tidak saling mengganggu, dengan pemisahan jalur sinyal dan daya untuk menjaga kestabilan sistem. Desain skematik keseluruhan dari rangkaian elektronik alat ditunjukkan pada Gambar 22, yang memperlihatkan hubungan antar komponen utama seperti ESP32, ADS1115, GPS NEO-7, SD Card, dan LCD 20x4.



Gambar 22. Skematik Rangkaian

3. Perancangan *Firmware*

Perancangan *Firmware* dimulai dari kondisi awal ketika sistem dinyalakan (mulai). Pada tahap ini, mikrokontroler ESP32 melakukan proses inisialisasi seluruh komponen yang terhubung ke sistem, meliputi LCD 20x4, modul ADC ADS1115, modul SD Card, dan modul GPS. Proses inisialisasi ini bertujuan untuk memastikan setiap modul berada dalam kondisi siap digunakan sebelum sistem masuk ke tahap pengambilan data.

Setelah inisialisasi selesai, sistem melakukan pengecekan komponen secara bertahap. Pengecekan pertama dilakukan pada LCD 20x4 untuk memastikan tampilan dapat berfungsi dengan baik. Jika LCD tidak terdeteksi atau tidak merespon, maka sistem mengaktifkan LED merah sebagai indikator kesalahan dan proses tidak dilanjutkan ke tahap berikutnya. Apabila LCD terdeteksi dengan baik, sistem melanjutkan pengecekan modul ADC ADS1115. Jika modul ADC tidak terdeteksi melalui komunikasi I²C, LED merah kembali menyala sebagai tanda bahwa sistem mengalami gangguan.

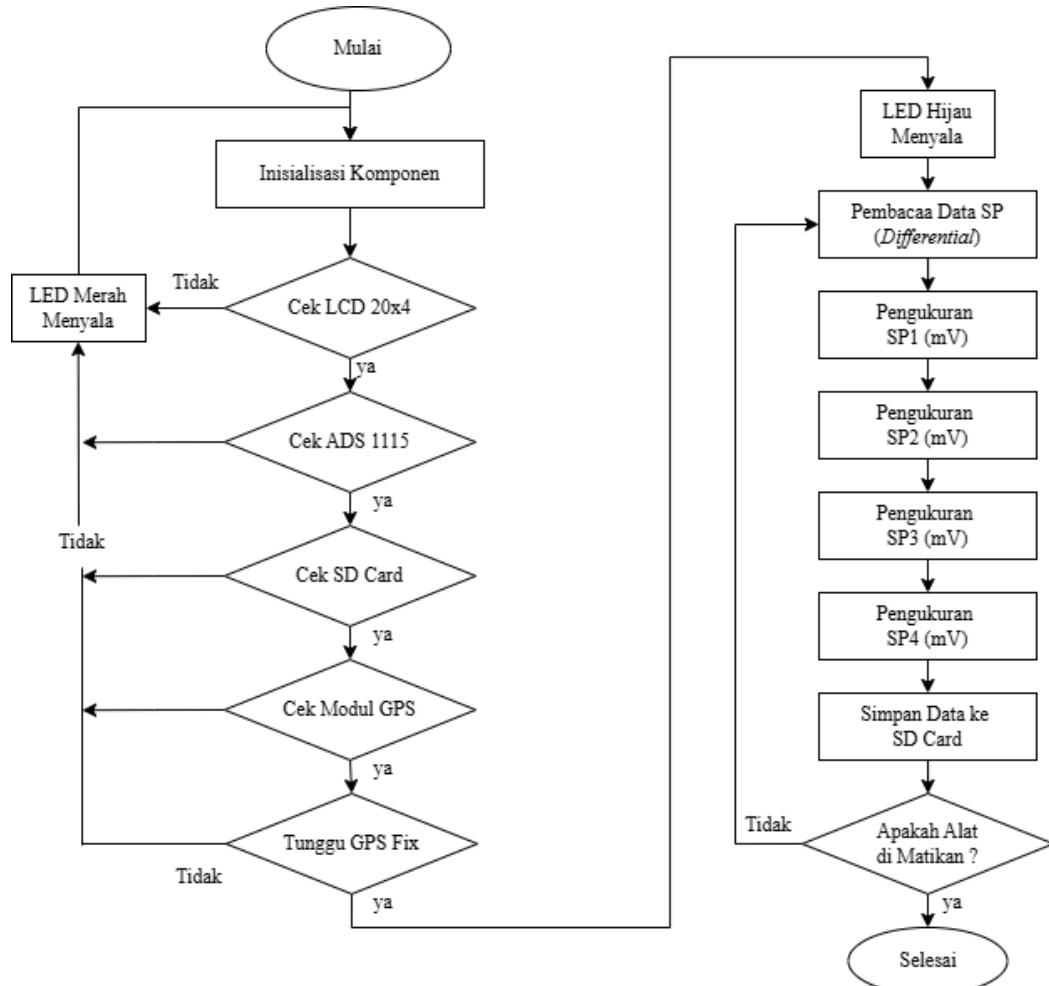
Tahap berikutnya adalah pengecekan modul SD Card. Jika SD Card tidak terbaca atau gagal diinisialisasi, maka LED merah akan menyala sebagai indikator error. Namun jika SD Card berhasil terdeteksi, sistem melanjutkan ke pengecekan modul GPS. Pada tahap ini, sistem memastikan modul GPS dapat berkomunikasi dengan ESP32. Jika modul GPS tidak terdeteksi, LED merah tetap menyala sebagai penanda kegagalan sistem.

Apabila seluruh modul telah terdeteksi dengan baik, sistem masuk ke tahap menunggu GPS fix. Pada tahap ini, sistem akan terus memantau data dari GPS hingga koordinat lokasi dan waktu valid diperoleh. Selama GPS belum mendapatkan fix, sistem tetap berada pada kondisi tersebut dan belum melakukan pengambilan data. Setelah GPS fix berhasil diperoleh, sistem masuk ke tahap pengukuran.

Pada tahap pengambilan data, LED hijau menyala sebagai indikator bahwa sistem bekerja normal. Proses pembacaan dilakukan secara diferensial menggunakan modul ADC ADS1115 untuk memperoleh nilai beda potensial Self Potential (SP). Pengukuran dilakukan secara berurutan pada kanal SP1, SP2, SP3, dan SP4 dalam satuan milivolt (mV). Setiap nilai yang terbaca akan diproses oleh ESP32, kemudian dikompilasi bersama data waktu dan koordinat sebelum disimpan ke dalam SD Card.

Setelah data berhasil disimpan, sistem melakukan pengecekan kondisi apakah alat dimatikan atau tidak. Jika alat masih dalam keadaan aktif, maka proses pembacaan data akan kembali ke tahap awal pengukuran dan berlangsung secara berulang (looping). Namun jika alat dimatikan, sistem menghentikan seluruh

proses dan masuk ke tahap selesai. Diagram alir *firmware* pada sistem ini ditunjukkan pada Gambar 23.



Gambar 23. Diagram Alir Program Pengukuran Data

F. Uji Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan sebagai tahapan awal untuk memastikan seluruh sistem dapat bekerja sesuai dengan perancangan sebelum diterapkan pada pengambilan data lapangan. Tahapan pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketelitian alat, kestabilan pembacaan sensor, kualitas elektroda yang digunakan, serta efisiensi konsumsi daya dari sistem secara keseluruhan. Pada penelitian ini, pengujian laboratorium dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu kalibrasi alat ukur *Self-Potential*, pengujian elektroda porospot, dan pengujian konsumsi daya perangkat.

1. Kalibrasi Sensor

Tahap kalibrasi alat ukur *Self-Potential* dilakukan pengujian untuk mengetahui tingkat ketelitian dan performa sistem dalam membaca nilai tegangan. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan alat terhadap multimeter digital sebagai alat referensi menggunakan variasi tegangan dari potensio trimpot. Parameter yang dianalisis pada pengujian ini meliputi nilai *error*, persentase *error*, persentase akurasi, *Root Mean Square Error* (RMSE), serta regresi linier. Pengujian tersebut dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan alat dengan nilai referensi sehingga dapat diketahui kelayakan sistem sebelum digunakan pada pengambilan data lapangan.

Nilai *error* digunakan untuk mengetahui selisih hasil pengukuran alat *Self-Potential* terhadap nilai referensi dari multimeter digital. Semakin kecil nilai *error* maka semakin baik tingkat ketelitian alat. Selain itu, persentase *error* digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran dalam bentuk persen terhadap nilai referensi, sedangkan persentase akurasi digunakan untuk mengetahui tingkat akurat alat dalam melakukan pengukuran. Persamaan (1) digunakan untuk menghitung nilai *error absolut* [53], Persamaan (2) digunakan untuk menghitung persentase *error*, dan Persamaan (3) digunakan untuk menghitung persentase akurasi [54].

$$EA_i = |SP_{alat,i} - SP_{multimeter,i}| \quad (1)$$

$$\text{Nilai Error}(\%) = \frac{\text{Data Kalibrasi} - \text{Data Sensor}}{\text{Data Kalibrasi}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Nilai Akurasi}(\%) = 100\% - \text{Error}(\%) \quad (3)$$

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengetahui rata-rata tingkat kesalahan hasil pengukuran alat terhadap nilai referensi. Pada penelitian ini, RMSE digunakan untuk membandingkan hasil pembacaan alat *Self-Potential* dengan hasil pengukuran multimeter digital sebagai alat acuan. Nilai RMSE menunjukkan seberapa besar penyimpangan data pengukuran yang diperoleh. Semakin kecil nilai RMSE maka

semakin baik tingkat kesesuaian hasil pembacaan alat terhadap nilai referensi. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dapat dihitung menggunakan Persamaan (4) [55].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SP_{alat,i} - SP_{multimeter,i})^2} \quad (4)$$

Keterangan:

- EA : *Error Absolut* (dalam satuan millivolt)
- SP_{alat} : Nilai *self potential* yang diukur oleh alat otomatis
- $SP_{multimeter}$: Nilai *self potential* referensi dari multimeter digital
- $RMSE$: *Root Mean Square Error* (satuan millivolt)
- n : Jumlah total sampel pengukuran
- $SP_{alat,i}$: Nilai SP dari alat otomatis pada titik ke- i
- $SP_{multimeter,i}$: Nilai SP dari multimeter digital pada titik ke- i

Regresi linier digunakan untuk mengetahui hubungan antara hasil pembacaan alat *Self-Potential* dengan nilai referensi dari multimeter digital. Analisis ini dilakukan untuk melihat tingkat kesesuaian data hasil pengukuran alat terhadap data referensi. Semakin mendekati nilai linier dan nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1, maka hubungan antara kedua data semakin baik dan menunjukkan bahwa alat memiliki performa pengukuran yang stabil. Persamaan regresi linier dapat dilihat pada Persamaan (5) [56].

$$y = ax + b \quad (5)$$

Keterangan:

- y : nilai referensi (multimeter).
- x : nilai alat.
- a : *slope* (kemiringan garis regresi).
- b : *intercept* (konstanta).

2. Uji Elektroda Poruspot

Uji elektroda poruspot dilakukan untuk mengetahui kualitas dan kestabilan elektroda yang digunakan pada sistem *Self Potential*. Pada penelitian ini digunakan 5 elektroda poruspot yang terdiri dari 1 elektroda referensi dan 4 elektroda pengukuran (SP1 sampai SP4). Pengujian dilakukan sebelum elektroda ditanam ke dalam tanah untuk memastikan setiap elektroda memiliki nilai beda potensial yang relatif sama. Pada proses pengujian, elektroda referensi digunakan sebagai titik acuan, sedangkan elektroda SP1 hingga SP4 diukur nilai potensialnya secara bergantian. Nilai pembacaan antar elektroda diharapkan berada pada rentang ± 5 mV agar hasil pengukuran tetap stabil dan tidak menimbulkan perbedaan nilai yang terlalu besar saat digunakan di lapangan. Jika terdapat elektroda dengan nilai yang belum sesuai, maka dilakukan penyesuaian larutan CuSO_4 dengan cara menambahkan atau mengurangi cairan hingga nilai pembacaan mendekati sama. Elektroda yang baik ditandai dengan nilai pengukuran yang stabil dan tidak mengalami fluktuasi yang signifikan selama proses pengujian.

3. Konsumsi Daya

Konsumsi daya digunakan untuk mengetahui besar daya yang digunakan oleh sistem selama proses pengoperasian. Perhitungan konsumsi daya diperoleh berdasarkan nilai tegangan dan arus yang digunakan oleh perangkat. Semakin besar arus yang digunakan maka konsumsi daya sistem juga akan semakin besar [57]. Persamaan (6) digunakan untuk menghitung konsumsi daya perangkat.

$$P = V \times I \quad (6)$$

Keterangan:

P = Daya (*Watt*)

V = Tegangan (*Volt*)

I = Arus (*Ampere*)

Estimasi lama penggunaan digunakan untuk mengetahui perkiraan waktu operasi sistem berdasarkan kapasitas energi baterai dan konsumsi daya perangkat. Perhitungan estimasi ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam

beroperasi selama proses penggunaan berlangsung [57]. Persamaan (7) digunakan untuk menghitung estimasi lama penggunaan sistem.

$$t = \frac{Wh}{P} \quad (7)$$

Keterangan:

t = Estimasi waktu penggunaan (jam)

Wh = Kapasitas energi baterai (*Watt-hour*)

P = Konsumsi daya perangkat (*Watt*)

G. Uji Keseluruhan Sistem

Uji keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja alat ukur *Self Potential* secara menyeluruh setelah seluruh rangkaian dan komponen terintegrasi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan alat dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang, mulai dari proses pembacaan data, pengolahan data, penyimpanan data, hingga penampilan informasi pada perangkat. Pada tahap pengujian, alat dijalankan secara penuh untuk melihat kestabilan sistem selama proses pengukuran berlangsung. Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap respon alat, kestabilan pembacaan data, serta kemampuan sistem dalam menjalankan proses pengukuran secara kontinu. Hasil pengujian keseluruhan sistem digunakan untuk mengetahui apakah alat telah bekerja dengan baik dan layak digunakan pada tahap pengambilan data penelitian.

H. Uji Lapang

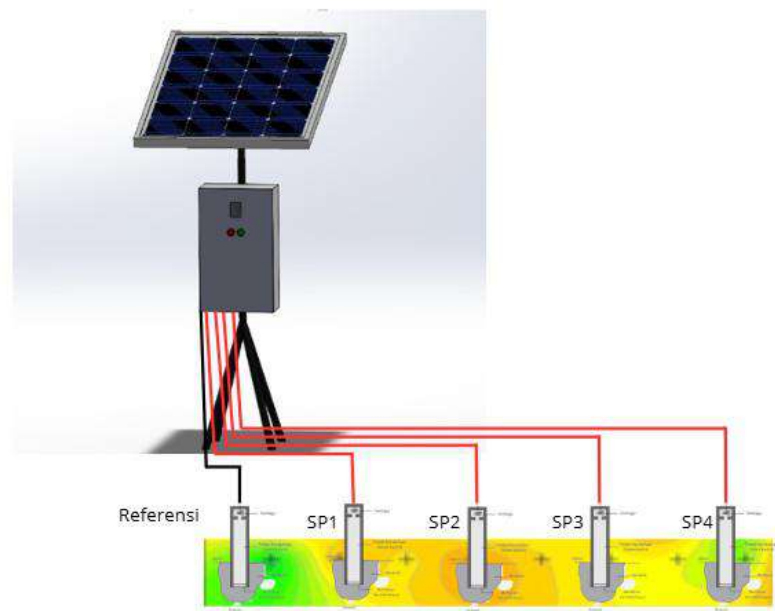
Uji lapang dilakukan agar kinerja dan keandalan alat bisa dilihat langsung saat digunakan di kondisi sebenarnya. Pengujian ini berlangsung selama tiga hari berturut-turut di dua lokasi berbeda, yaitu tanah bauksit dan tanah pesisir. Pengambilan data selama beberapa hari bertujuan melihat apakah hasil pengukuran tetap konsisten atau mengalami perubahan dari waktu ke waktu. Selain itu, perbedaan jenis tanah juga dimanfaatkan agar terlihat bagaimana respon alat terhadap kondisi tanah yang tidak sama.

Titik pengukuran ditentukan berdasarkan koordinat geografis dan disusun dalam satu lintasan lurus dengan jarak yang sama. Jumlah titik yang digunakan

terdiri dari empat titik pengukuran (SP1–SP4) dan satu titik referensi (SPref). Pemilihan empat titik ini dilakukan agar perubahan nilai *Self Potential* bisa terlihat secara bertahap dari satu titik ke titik berikutnya. Dengan susunan seperti ini, arah dan pola perubahan potensial jadi lebih mudah diamati.

Selama pengujian, sistem utama ditempatkan di dalam box panel yang dilengkapi panel surya sebagai sumber daya. Box ini berfungsi melindungi rangkaian dari gangguan luar seperti debu, air, dan perubahan cuaca. Elektroda referensi dipasang di satu titik tetap sebagai acuan, sedangkan elektroda SP1 sampai SP4 ditanam di tanah secara lurus membentuk satu garis pengukuran dengan jarak antar titik sekitar 5 meter [58].

Proses pengambilan data menggunakan dua modul ADC ADS1115 dengan metode diferensial. Modul pertama membaca SP1 dan SP2, sedangkan modul kedua membaca SP3 dan SP4. Cara ini membuat pembacaan tegangan dalam satuan milivolt menjadi lebih sensitif sekaligus membantu mengurangi gangguan noise. Data yang terbaca kemudian diproses oleh ESP32, ditampilkan secara *real-time*, dan disimpan ke SD Card sebagai data hasil pengujian. Hasil pengukuran selanjutnya dianalisis untuk melihat pola distribusi potensial di sepanjang lintasan serta menilai kestabilan alat saat digunakan di lapangan. Ilustrasi uji lapang dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Ilustrasi Uji Lapang
(Sumber : <https://tinyurl.com/4rsmnsr6>)

I. Analisis Data

Analisis *Self Potential* (SP) dilakukan untuk memahami karakteristik potensial alami tanah berdasarkan data hasil pengukuran di setiap titik. Data yang telah direkam melalui alat kemudian diolah secara statistik deskriptif, meliputi perhitungan nilai rata-rata, nilai maksimum, dan nilai minimum untuk melihat kecenderungan serta kestabilan hasil pengukuran.

Hasil pengolahan data tersebut kemudian digunakan untuk menampilkan visualisasi spasial dalam bentuk peta sebaran. Nilai SP diplot berdasarkan koordinat GPS dan diinterpolasikan menjadi peta kontur agar pola variasi potensial di permukaan tanah dapat terlihat dengan jelas. Nilai ΔSP yang positif menunjukkan adanya potensi aliran arus ke arah titik pengukuran, sedangkan nilai negatif menunjukkan arah arus menjauhi titik tersebut. Secara matematis, perhitungan nilai SP antar titik pengukuran dapat dituliskan pada Persamaan (8) [59].

$$\Delta SP = SP_i - SP_{ref} \quad (8)$$

Keterangan:

- ΔSP : Perbedaan potensial antara titik pengukuran dan titik referensi (mV)
- SP_i : Nilai potensial pada titik ke-i (mV)
- SP_{ref} : Nilai potensial pada titik referensi (mV)

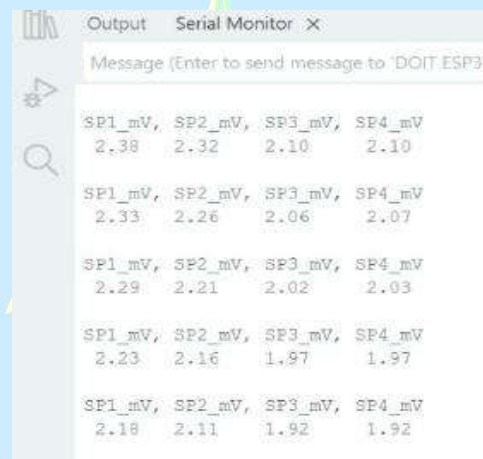
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Uji Fungsional

1. Modul ADC ADS1115

Hasil uji fungsionalitas modul ADS1115 dilakukan menggunakan *library* *Adafruit_ADS1X15* yang telah tersedia pada Arduino IDE melalui menu *File > Examples > Adafruit_ADS1X15 > differential*. Hasil Pembacaan tegangan *Self Potential* ditampilkan melalui Serial Monitor Arduino IDE. Modul ADC ADS1115 dinyatakan berfungsi dengan baik jika mampu menampilkan tegangan berorde milivolt. Hasil pembacaan pada serial monitor dapat dilihat pada Gambar 25.



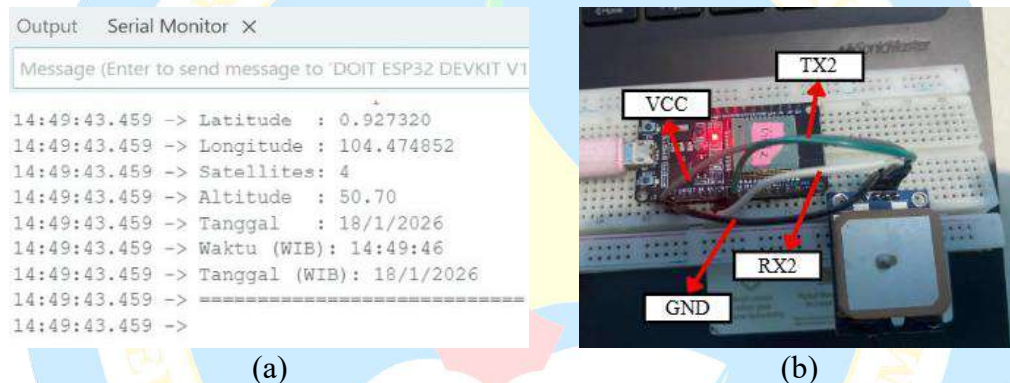
Gambar 25. Hasil uji Modul ADC ADS1115

2. Modul GPS NEO-7

Hasil Uji fungsionalitas modul GPS *NEO-7* dilakukan menggunakan *library* *TinyGPSPlus.h* yang tersedia pada Arduino IDE melalui menu *File > Examples > TinyGPSPlus > DeviceExample*. *Library* tersebut digunakan untuk membaca dan mengolah data koordinat dari satelit, seperti *latitude*, *longitude*, *altitude*, serta jumlah satelit yang terhubung. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan modul GPS *NEO-7* ke mikrokontroler ESP32 sesuai dengan rangkaian yang telah dirancang. Data yang diperoleh ditampilkan secara *real-time* melalui serial monitor untuk memastikan modul bekerja dengan baik dan mampu menerima sinyal satelit

secara stabil. Hasil pembacaan dapat dilihat pada Gambar 26 (a), Dokumentasi proses pengujian modul SD Card dapat dilihat pada Gambar 26 (b).

Selain data koordinat, sistem juga menampilkan informasi waktu dan tanggal yang secara default mengacu pada standar UTC (*Coordinated Universal Time*). Penyesuaian dengan lokasi pengujian yang berada pada zona Waktu Indonesia Barat (WIB), dilakukan penambahan *offset* sebesar +7 jam (UTC+7) pada program. Penyesuaian ini bertujuan agar waktu yang ditampilkan pada serial monitor sesuai dengan waktu lokal setempat. Keberhasilan pengujian modul GPS *NEO-7* ditandai dengan data koordinat dan waktu yang terbaca secara stabil, serta indikator LED merah pada modul yang berkedip sebagai tanda bahwa modul telah terkoneksi dengan satelit.



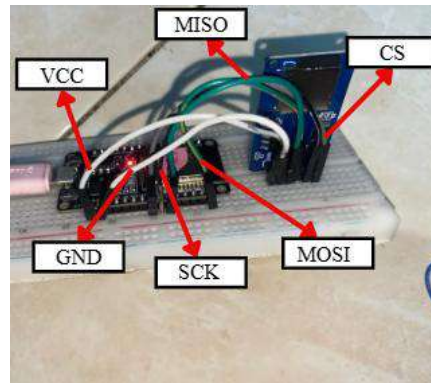
Gambar 26. (a) Hasil uji modul GPS *NEO-7*, (b) Dokumentasi uji modul *GPS NEO-7*

3. Modul SD Card

Hasil uji fungsionalitas modul SD Card dilakukan menggunakan library *SD.h* yang tersedia pada Arduino IDE melalui menu *File > Examples > SD > ReadWrite*. Library ini digunakan untuk proses inisialisasi modul SD Card, pembuatan file, penulisan data (*write*), dan pembacaan data (*read*) pada kartu SD. Pengujian dilakukan untuk memastikan modul SD Card dapat bekerja dengan baik sebagai media penyimpanan data pada alat ukur *Self Potential*. Data yang telah ditulis kemudian dibaca kembali untuk memastikan proses penyimpanan berjalan dengan benar. Hasil pembacaan modul SD Card pada serial monitor dapat dilihat pada Gambar 27 (a), sedangkan dokumentasi proses pengujian modul SD Card ditunjukkan pada Gambar 27 (b).



(a)



(b)

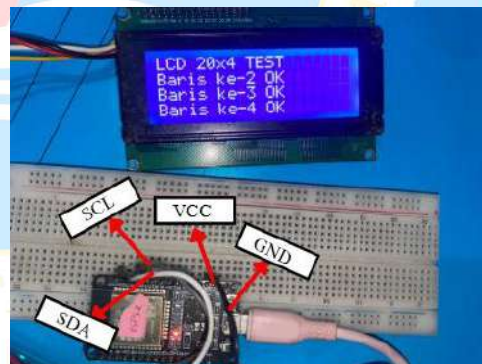
Gambar 27. (a) Hasil uji Modul SD Card, (b) Dokumentasi uji modul SD Card

4. Modul LCD 20x4

Hasil uji fungsionalitas modul LCD 20x4 dilakukan menggunakan *library LiquidCrystal_I2C.h*, yang dapat ditambahkan melalui *Library Manager* pada Arduino IDE. Library ini digunakan untuk melakukan inisialisasi tampilan, pengaturan alamat I²C, serta menampilkan data pada layar LCD. Hasil uji fungsional beberapa teks konektivitas pada LCD 20x4 di serial monitor dapat dilihat pada Gambar 28 (a), sedangkan dokumentasi proses hasil pengujian LCD 20x4 ditunjukkan pada Gambar 28 (b).



(a)



(b)

Gambar 28. (a) Hasil Uji LCD 20x4, (b) Dokumentasi Uji LCD 20x4

B. Hasil Pengembangan *Electrical*

Berdasarkan hasil proses pengembangan sistem *electrical*, langkah awal yang dilakukan yaitu pembuatan papan PCB sesuai dengan desain rangkaian yang telah dirancang sebelumnya. Setelah proses pencetakan PCB selesai, dilakukan pemasangan dan penyolderan pin header, konektor JST, serta jalur penghubung

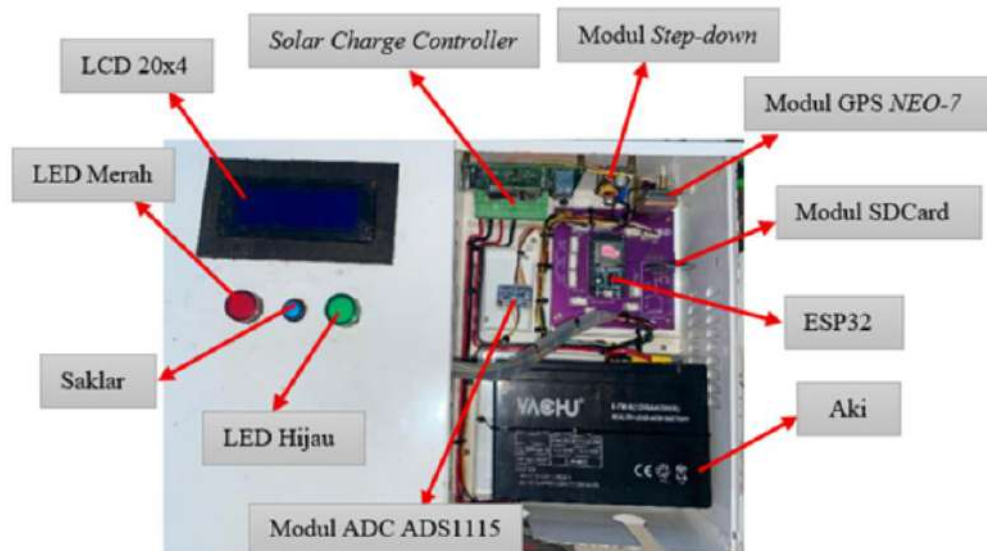
antar komponen agar setiap modul dapat terhubung dengan baik dan memiliki koneksi listrik yang stabil. Tahapan ini dilakukan secara bertahap untuk meminimalkan kesalahan koneksi yang dapat mempengaruhi kinerja sistem saat proses pengukuran berlangsung. Selain itu, penataan posisi komponen juga diperhatikan agar sistem lebih rapi, mudah dalam proses perawatan, dan aman saat digunakan di lapangan.

Komponen utama yang digunakan pada sistem terdiri dari ESP32 sebagai pusat kendali alat, modul ADC ADS1115 yang digunakan untuk membaca nilai beda potensial dengan resolusi tinggi, modul SD Card sebagai media penyimpanan data hasil pengukuran, serta modul GPS NEO-7 yang berfungsi untuk merekam koordinat lokasi pengambilan data. Seluruh komponen tersebut diintegrasikan dalam satu sistem agar proses pembacaan data, pengolahan data, dan penyimpanan data dapat berjalan secara otomatis dan terkoordinasi. Penggunaan modul ADC ADS1115 dipilih karena memiliki resolusi pembacaan yang lebih tinggi dibanding ADC internal mikrokontroler sehingga lebih sesuai untuk pengukuran Self Potential yang memiliki sinyal tegangan relatif kecil dalam satuan milivolt.

Sistem juga dilengkapi dengan modul step-down converter yang berfungsi untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan keluaran sesuai kebutuhan masing-masing perangkat. Penggunaan *step-down* diperlukan karena beberapa modul memiliki tegangan kerja yang berbeda sehingga diperlukan distribusi daya yang stabil agar sistem dapat bekerja dengan baik. Selain itu, sistem menggunakan *Solar Charge Controller* (SCC) yang berfungsi mengatur proses pengisian daya dari panel surya ke aki agar pengisian berlangsung lebih aman dan terkontrol. Energi utama sistem berasal dari panel surya berkapasitas 60 WP yang digunakan untuk menyuplai daya sekaligus mengisi aki 12V sebagai penyimpanan energi cadangan. Dengan adanya sistem catu daya tersebut, alat ukur dapat bekerja secara mandiri tanpa bergantung pada sumber listrik eksternal sehingga lebih fleksibel digunakan pada lokasi pengukuran lapangan.

Bagian luar box panel dilengkapi LCD 20×4 yang digunakan untuk menampilkan informasi hasil pengukuran dan status sistem secara langsung. Selain itu terdapat LED hijau dan LED merah sebagai indikator kondisi perangkat selama proses operasi berlangsung. Saklar dipasang sebagai pengendali utama untuk

menyalakan dan mematikan sistem, sedangkan terminal kabel digunakan sebagai jalur penghubung antara alat dengan elektroda pengukuran. Keseluruhan komponen disusun di dalam box panel agar perangkat lebih aman, terlindungi dari gangguan luar, serta memudahkan proses pengoperasian di lapangan. Susunan keseluruhan komponen sistem electrical tersebut dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Peletakan Komponen pada box panel

C. Hasil Pengembangan *Firmware*

Pengembangan *firmware* menggunakan Arduino IDE sebagai perangkat lunak kode pemrograman. Pengembangan *firmware* pertama kali dilakukan dengan cara melakukan deklarasi untuk *library* dari setiap komponen-komponen yang digunakan, yaitu *Library Wire.h*, *SPI.h*, *SD.h*, *Adafruit_ADS1X15.h*, *LiquidCrystal_I2C.h*, *TinyGPSPlus.h*, dan *HardwareSerial.h*. *Library* ini digunakan untuk dapat mengakses semua komponen yang digunakan. *Library* yang digunakan dapat dilihat Gambar 30. Kode program lengkap sistem disajikan pada Lampiran 4.

```
#include <Wire.h>           // Komunikasi I2C
#include <SPI.h>            // Komunikasi SPI
#include <SD.h>             // Akses SD card
#include <Adafruit_ADS1X15.h> // ADC eksternal ADS1X15
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // LCD I2C
#include <TinyGPSPlus.h>    // Pemrosesan data GPS
#include <HardwareSerial.h> // Serial hardware tambahan
```

Gambar 30. Program Library Secara Keseluruhan

Setelah library dideklarasikan, *firmware* mendefinisikan pin dan objek utama sistem, yaitu LED hijau dan LED merah sebagai indikator status, pin chip select untuk modul SD Card, dua buah objek ADS1115 sebagai modul pembaca sinyal *Self Potential*, objek LCD 20×4 sebagai media tampilan, serta objek GPS untuk pembacaan lokasi dan waktu. Selain itu, didefinisikan pula variabel global untuk menampung nilai mentah hasil pembacaan ADS1115 (SP1_raw sampai SP4_raw) dan nilai hasil koreksi regresi (SP1 sampai SP4). Konfigurasi pin, objek, dan variabel utama sistem ditunjukkan pada Gambar 31.

```
// ===== PIN =====
#define LED_GREEN 32      // LED indikator normal
#define LED_RED 33       // LED indikator error
#define SD_CS 5          // Chip Select SD card

// ===== OBJEK =====
Adafruit_ADS1115 ads1;    // ADC ADS1115 1
Adafruit_ADS1115 ads2;    // ADC ADS1115 2
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // LCD 20x4 I2C
TinyGPSPlus gps;         // Objek GPS
HardwareSerial gpsSerial(1); // Serial GPS
File dataFile;           // File SD card

// ===== GLOBAL DATA =====
float SP1_raw, SP2_raw, SP3_raw, SP4_raw; // Data mentah SP
float SP1, SP2, SP3, SP4;                // Data SP hasil olah

int dayWIB, monthWIB, yearWIB;           // Tanggal WIB
int hourWIB, minuteWIB, secondWIB;       // Waktu WIB
```

Gambar 31. Konfigurasi Pin LED hijau dan merah, Modul SD Card dan Variabel

Pada fungsi *setup()*, *firmware* menjalankan proses inisialisasi awal sistem. Proses ini meliputi pengaturan mode pin LED sebagai output, inisialisasi komunikasi serial, serta pemanggilan fungsi *cekSistem()* untuk melakukan pengecekan setiap modul yang digunakan. Pengecekan dilakukan secara berurutan, yaitu LCD, modul ADS1115, modul Micro SD Card, dan modul GPS. Status pengecekan ditampilkan pada LCD. Apabila salah satu modul tidak terdeteksi atau mengalami kesalahan, sistem akan menampilkan pesan error dan menghentikan proses kerja. Sebaliknya, jika seluruh modul terdeteksi dengan baik, sistem memberikan indikator siap melalui LED hijau yang berkedip beberapa kali sebagai tanda bahwa alat siap digunakan. Alur proses inisialisasi dan pengecekan modul pada fungsi *setup()* ditunjukkan pada Gambar 32.

```

// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);
    pinMode(LED_RED, OUTPUT);

    digitalWrite(LED_GREEN, LOW);
    digitalWrite(LED_RED, LOW);

    cekSistem();
    indikasiSiap();
}

```

Gambar 32. Program Variabel dan Pin Inisialisasi.

Setelah proses inisialisasi berhasil, sistem membaca nilai beda potensial dari empat kanal menggunakan modul ADC ADS1115. Data hasil pembacaan kemudian diproses menggunakan fungsi koreksi pada masing-masing probe pengukuran SP1 hingga SP4. Fungsi koreksi ini disiapkan pada firmware untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi hasil kalibrasi. Implementasi fungsi koreksi regresi linier pada *firmware* ditunjukkan pada Gambar 33.

```

float A_SP1, B_SP1;
float A_SP2, B_SP2;
float A_SP3, B_SP3;
float A_SP4, B_SP4;

void Regresi() {
    SP1 = A_SP1 * SP1_raw + B_SP1;
    SP2 = A_SP2 * SP2_raw + B_SP2;
    SP3 = A_SP3 * SP3_raw + B_SP3;
    SP4 = A_SP4 * SP4_raw + B_SP4;
}

```

Gambar 33. Kode program Koreksi Regresi Linier

Firmware pada sistem ini digunakan untuk mengatur tampilan hasil pengukuran pada LCD 20x4 secara *real-time*. Informasi yang ditampilkan meliputi nilai *Self Potential* dari masing-masing probe pengukuran, yaitu SP1 hingga SP4, dalam satuan milivolt (mV). Tampilan LCD dirancang agar pengguna dapat memantau kondisi pengukuran secara langsung di lapangan tanpa perlu menghubungkan alat ke komputer atau membuka data hasil penyimpanan pada SD Card terlebih dahulu. Selain menampilkan nilai pengukuran, LCD juga digunakan sebagai indikator bahwa sistem telah bekerja dengan baik dan proses pembacaan data berlangsung secara normal. Penggunaan LCD 20x4 pada sistem ini membantu

mempermudah proses monitoring karena hasil pengukuran dapat dilihat secara langsung selama proses pengambilan data berlangsung. Implementasi kode program tampilan LCD 20x4 ditunjukkan pada Gambar 34.

```
void LCD_Output() {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SELF POTENSIAL (mV)");

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("SP1: "); lcd.print(SP1);
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("SP2: "); lcd.print(SP2);
}
```

Gambar 34. Kode Program LCD 20x4

Kode program pada bagian ini digunakan untuk menyimpan data hasil pembacaan alat ke dalam media penyimpanan Micro SD Card secara otomatis. Data yang disimpan meliputi nilai *Self Potential* pada setiap kanal pengukuran beserta informasi tanggal dan waktu pengambilan data. Proses penyimpanan dilakukan menggunakan mode *append* sehingga data baru akan ditambahkan ke dalam file tanpa menghapus data sebelumnya. Format penyimpanan dibuat terstruktur agar data mudah dibaca kembali pada proses pengolahan dan analisis. Dengan adanya sistem penyimpanan ini, seluruh data hasil pengukuran dapat terdokumentasi secara rapi. Kode program SD Card dapat dilihat pada Gambar 35.

```
void SDCard() { // Simpan data ke SD
    dataFile = SD.open(filename, FILE_APPEND); // Buka file
    if (!dataFile) return; // Keluar jika gagal

    dataFile.print(dayWIB); dataFile.print("/"); // Tanggal
    dataFile.print(monthWIB); dataFile.print("/");
    dataFile.print(yearWIB); dataFile.print(",");

    dataFile.print(hourWIB); dataFile.print(":"); // Waktu
    dataFile.print(minuteWIB); dataFile.print(":");
    dataFile.print(secondWIB); dataFile.print(",");

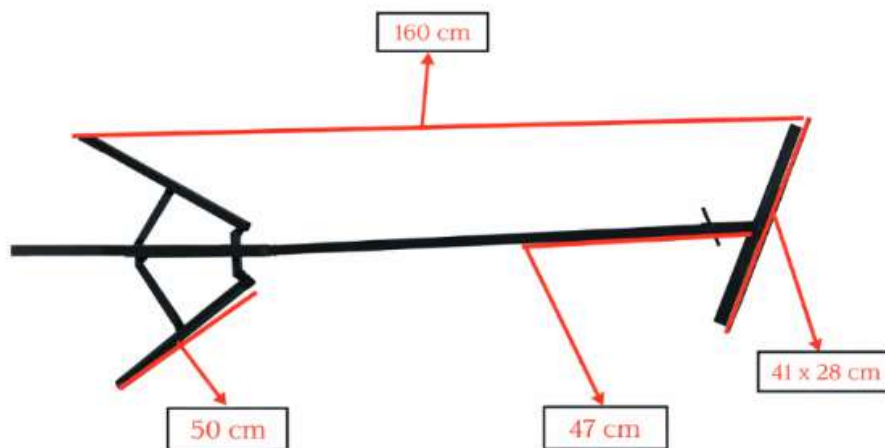
    dataFile.print(SP1); dataFile.print(","); // SP1
    dataFile.print(SP2); dataFile.print(","); // SP2
    dataFile.print(SP3); dataFile.print(","); // SP3
    dataFile.print(SP4); dataFile.print(","); // SP4
}
```

Gambar 35. Kode program SDCard

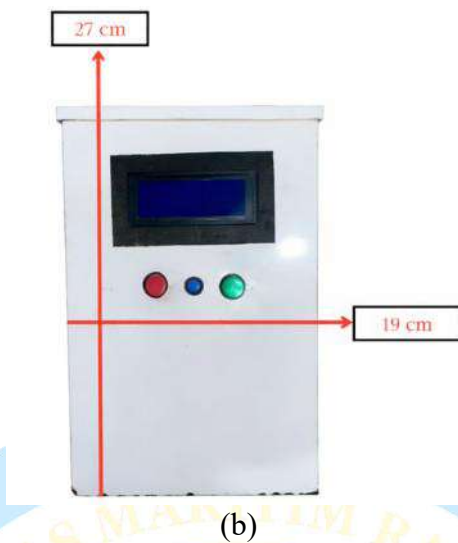
D. Hasil Pengembangan *Hardware*

Berdasarkan hasil pengembangan *hardware*, alat pengukur *Self Potensial* ini terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi dalam satu sistem. Struktur utama alat menggunakan besi hollow berukuran 4×4 cm dengan ketebalan 1 inch sebagai rangka penopang utama. Penggunaan besi hollow dipilih karena memiliki konstruksi yang cukup kuat untuk menopang seluruh komponen alat saat proses pengukuran berlangsung. Bagian bawah rangka dirancang menyerupai kaki tripod dengan tinggi 50 cm sehingga total tinggi alat mencapai 160 cm. Desain kaki tripod dibuat agar dapat dibuka dan ditutup untuk memudahkan proses pemasangan, pemindahan alat, serta menjaga kestabilan alat saat digunakan di lapangan.

Bagian atas rangka dipasangudukan panel surya berukuran panjang 41 cm dan lebar 28 cm sebagai tempat pemasangan panel surya 60 WP yang digunakan sebagai sumber daya utama sistem. Selain itu, bagian tengah rangka ditempatkan box panel berukuran panjang 27 cm dan lebar 19 cm yang digunakan sebagai wadah komponen elektronik alat pengukur *Self Potensial*, meliputi ESP32, modul ADC ADS1115, modul SD Card, modul GPS NEO-7, modul *step-down*, SCC, dan aki. Penempatan box panel dilakukan agar sistem lebih rapi, aman, dan mudah dioperasikan saat proses pengukuran berlangsung. Ukuran rangka besi hollow dan dudukan panel surya dapat dilihat pada Gambar 36 (a), sedangkan ukuran box panel alat pengukur *Self Potensial* dapat dilihat pada Gambar 36 (b).

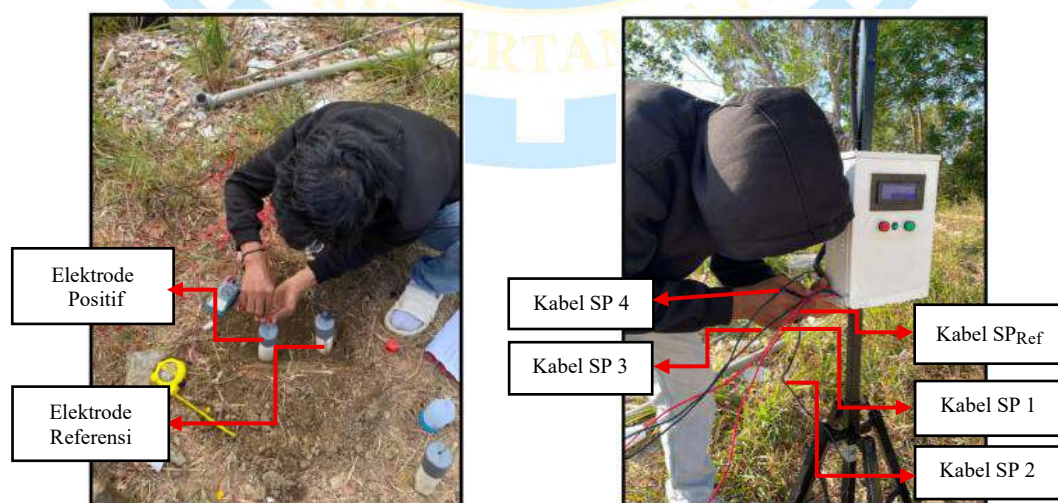


(a)



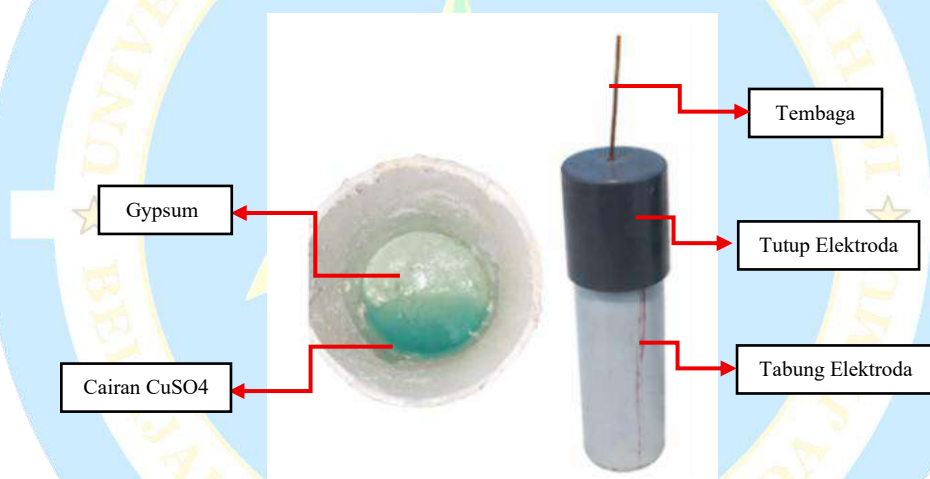
Gambar 36. (a) Ukuran rangka besi hollow, (b) ukuran box panel komponen

Setelah seluruh komponen sistem terpasang dengan baik, tahap selanjutnya adalah pemasangan kabel pengukuran *Self Potential* pada elektroda. Pada sistem pengukuran ini digunakan satu kabel berwarna hitam sebagai kabel referensi dan empat kabel berwarna merah sebagai kabel positif. Kabel referensi berfungsi sebagai titik acuan pengukuran, sedangkan kabel positif digunakan untuk membaca perbedaan potensial listrik pada setiap titik pengukuran. Masing-masing kabel dihubungkan menggunakan capit buaya yang digunakan untuk mencapit elektroda tembaga sehingga koneksi listrik dapat terjaga dengan baik dan stabil selama proses pengambilan data. Pemasangan kabel pengukuran *Self Potential* pada elektroda dapat dilihat pada Gambar 37.



Gambar 37. Pemasangan Kabel pengukuran elektroda *Self Potential*

Elektroda *Self Potential* dibuat dari pipa PVC dengan panjang 15 cm dan diameter 1½ inci. Di dalam pipa diisi larutan CuSO₄ sebanyak 50 ml sebagai elektrolit, dengan batang tembaga ditempatkan di bagian tengah sebagai konduktor. Pada bagian ujung elektroda dibuat lapisan berpori dari campuran gipsium dan larutan CuSO₄ dengan perbandingan 1:3 dan ketebalan sekitar 2 cm. Lapisan gipsium ini berfungsi untuk menjaga kontak antara elektroda dengan tanah agar tetap stabil saat pengukuran dilakukan. Selain itu, gipsium juga membantu menjaga kelembapan di sekitar ujung elektroda sehingga larutan CuSO₄ tetap bekerja dengan baik. Dengan adanya lapisan ini, gangguan pada pembacaan seperti noise atau perubahan nilai yang tidak stabil dapat dikurangi, sehingga hasil pengukuran beda potensial menjadi lebih akurat dan konsisten. Bentuk hasil pembuatan elektroda *Self Potential* dapat dilihat pada Gambar 38.



Gambar 38. Bentuk hasil pembuatan elektroda *Self Potential*

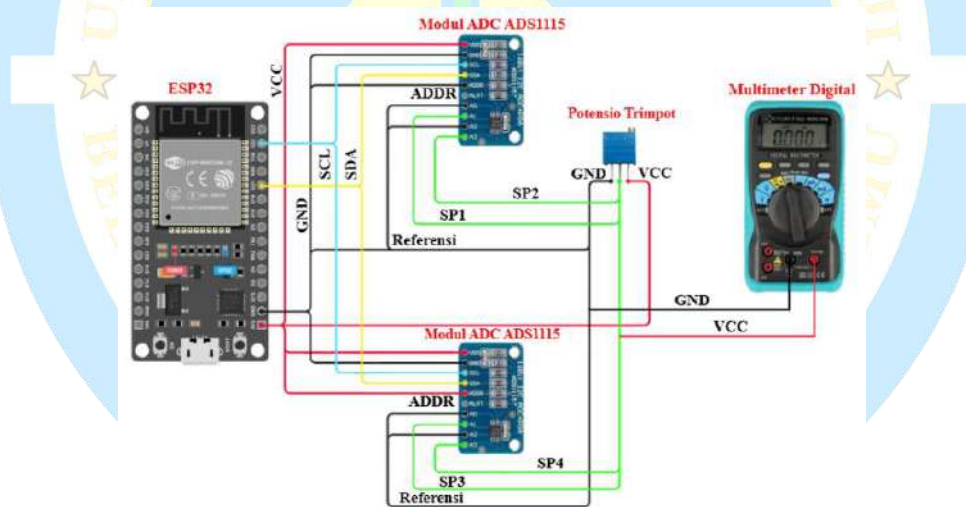
E. Uji Laboratorium

1. Hasil Kalibrasi Modul ADC ADS1115

Kalibrasi modul ADC ADS1115 dilakukan menggunakan potensiometer trimpot sebagai sumber tegangan variabel. Kaki VCC trimpot dihubungkan ke VCC, sedangkan kaki GND dihubungkan ke GND rangkaian. Pin keluaran trimpot kemudian dihubungkan secara bersamaan ke pin A0 hingga A3 pada modul ADS1115. Proses kalibrasi dilakukan dengan memutar trimpot untuk menghasilkan variasi tegangan yang disesuaikan dengan nilai yang terukur pada multimeter, dengan rentang tegangan mulai dari 0 mV hingga 20 mV. Pengambilan data

dilakukan secara bertahap setiap kenaikan 1 mV atau 2 mV, di mana pada setiap titik tegangan diambil sebanyak 50 data pengukuran pada masing-masing probe.

Nilai hasil pengukuran kemudian dirata-ratakan dan dianalisis menggunakan perhitungan *error*, persentase *error*, persentase akurasi, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan regresi linier. Perhitungan *error* dilakukan untuk mengetahui selisih antara hasil pembacaan ADS1115 dengan nilai referensi dari multimeter, sedangkan persentase *error* digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran dalam bentuk persen. Persentase akurasi digunakan untuk mengetahui tingkat ketepatan hasil pembacaan sistem terhadap nilai referensi. Selain itu, perhitungan RMSE dilakukan untuk mengetahui rata-rata tingkat kesalahan hasil pengukuran secara keseluruhan. Analisis regresi linier digunakan untuk melihat hubungan antara tegangan masukan dan hasil pembacaan ADC, sehingga dapat diketahui tingkat linearitas sistem pengukuran. Rangkaian kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 39, sedangkan dokumentasi proses kalibrasi Modul ADC ADS1115 ditunjukkan pada Gambar 40.



Gambar 39. Rangkaian Kalibrasi Modul ADC ADS1115



Gambar 40. Dokumentasi proses kalibrasi Modul ADC ADS1115

Tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan *error*, persentase *error*, persentase akurasi, dan *Root Mean Square Error* (RMSE) pada tegangan 20 mV untuk probe SP1 hingga SP4. Perhitungan *error* dilakukan menggunakan Persamaan (1), persentase *error* menggunakan Persamaan (2), persentase akurasi menggunakan Persamaan (3), dan RMSE menggunakan Persamaan (4) yang telah dijelaskan pada Bab 3. Nilai *error* diperoleh dari selisih antara hasil pembacaan sensor dan nilai referensi multimeter, sedangkan persentase *error* digunakan untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran dalam bentuk persen. Persentase akurasi digunakan untuk mengetahui tingkat ketepatan hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi, dan RMSE digunakan untuk mengetahui rata-rata tingkat kesalahan pengukuran pada sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, setiap probe pengukuran menunjukkan nilai *error* yang relatif kecil dengan persentase akurasi yang tinggi. Probe SP1 memiliki nilai *error* sebesar 0,08304 mV dengan akurasi 99,5848%, SP2 memiliki *error* sebesar 0,0849 mV dengan akurasi 99,5753%, SP3 memiliki *error* sebesar 0,0727 mV dengan akurasi 99,6361%, sedangkan SP4 memiliki *error* sebesar 0,0773 mV dengan akurasi 99,6131%. Selain itu, nilai RMSE pada setiap probe juga tergolong kecil sehingga menunjukkan bahwa sistem pembacaan *Self Potential* memiliki tingkat kesalahan pengukuran yang rendah dan pembacaan yang cukup stabil. Data lengkap hasil pengukuran dan perhitungan pada rentang tegangan 0 mV hingga 20 mV disajikan pada Lampiran 1.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Error, Akurasi, dan RMSE pada Tegangan 20 mV				
Keterangan	SP1	SP2	SP3	SP4
<i>Error (mV)</i>	0,08304	0,0849	0,0727	0,0773
Persentase <i>Error (%)</i>	0,4152	0,4247	0,3639	0,3869
Persentase Akurasi (%)	99,5848	99,5753	99,6361	99,6131
RMSE	0.0577	0,0554	0,0500	0,0516

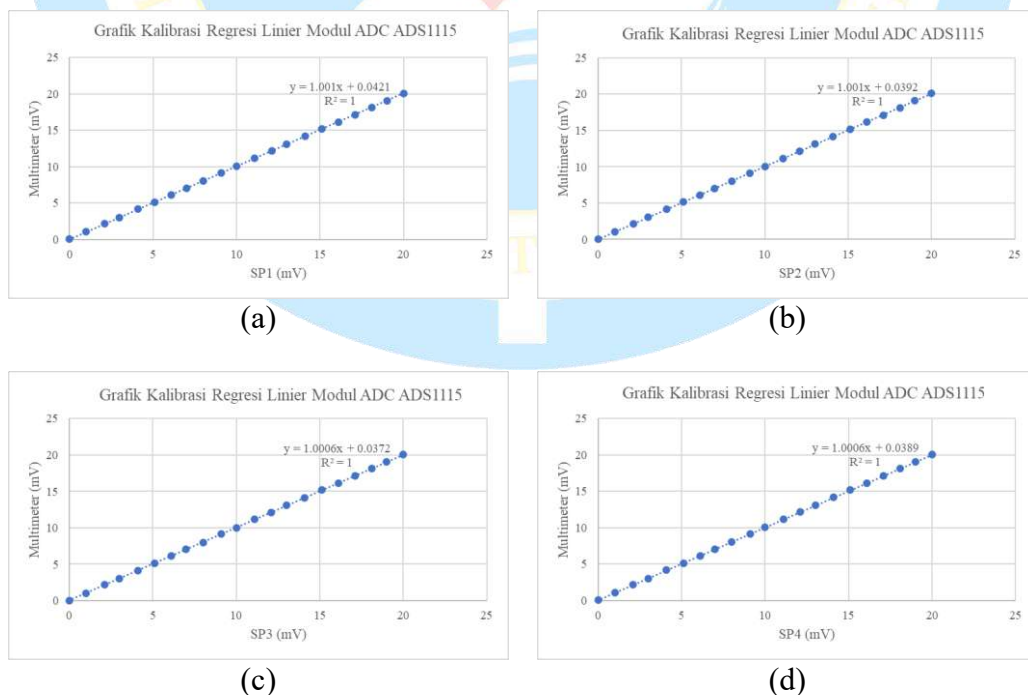
Hasil analisis regresi linier modul ADC ADS1115 pada kanal SP1 hingga SP4 dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 41. Analisis regresi linier dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai tegangan referensi multimeter dengan hasil

pembacaan sensor pada setiap kanal pengukuran. Perhitungan regresi dilakukan berdasarkan Persamaan (5) yang telah dijelaskan pada Bab 3 dengan parameter slope (a), intercept (b), dan koefisien determinasi (R^2).

Berdasarkan hasil pengujian, seluruh kanal pengukuran menunjukkan hubungan linier yang sangat baik antara tegangan referensi dan hasil pembacaan sensor. Nilai slope pada setiap kanal mendekati 1 dengan nilai intercept yang relatif kecil. Selain itu, nilai koefisien determinasi (R^2) pada seluruh kanal menunjukkan nilai 1, yang menandakan bahwa hasil pembacaan modul ADC ADS1115 memiliki tingkat linearitas yang sangat tinggi terhadap tegangan masukan. Grafik regresi linier pada Gambar 41 juga menunjukkan pola hubungan yang hampir membentuk garis lurus sehingga sistem pembacaan *Self Potential* dinilai mampu bekerja dengan stabil dan memiliki tingkat ketelitian yang baik.

Tabel 10. Hasil Kalibrasi Regresi Linier Modul ADC ADS1115

<i>Self Potential</i>	Slope (a)	Intersep (b)	R^2
1	1,001	0,0421	1
2	1,001	0,0392	1
3	1,0006	0,0372	1
4	1,0006	0,0389	1



Gambar 41. (a) Probe SP1, (b) Probe SP2, (c) Probe SP3, dan (d) Probe SP4

Berdasarkan hasil pengolahan data kalibrasi antara pembacaan modul ADC ADS1115 dan multimeter digital sebagai nilai referensi, diperoleh persamaan regresi linier pada masing-masing probe pengukuran SP1 hingga SP4. Persamaan regresi tersebut digunakan untuk mengurangi selisih antara nilai pembacaan ADC dan nilai referensi sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat dan stabil. Nilai koefisien regresi yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam keseluruhan kode program *firmware* ESP32 sebagai fungsi koreksi pembacaan tegangan pada setiap probe pengukuran. Implementasi kode program hasil regresi linier ditunjukkan pada Gambar 42.

```
const float A_SP1 = 1.0010, B_SP1 = 0.0421;
const float A_SP2 = 1.0010, B_SP2 = 0.0392;
const float A_SP3 = 1.0006, B_SP3 = 0.0372;
const float A_SP4 = 1.0006, B_SP4 = 0.0389;

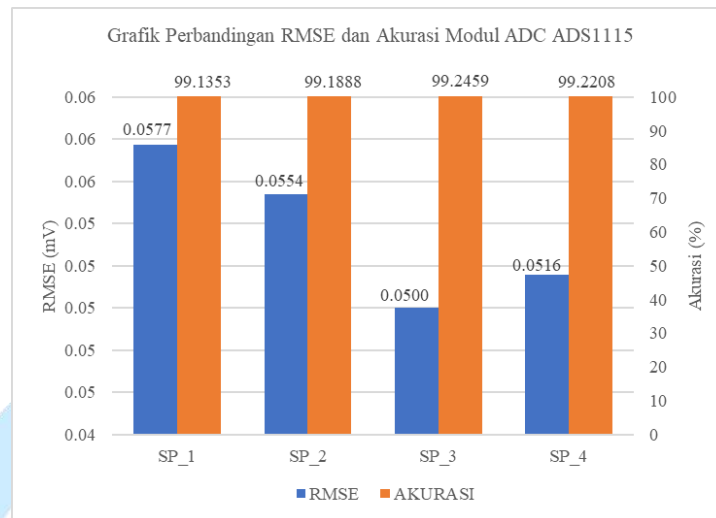
SP1 = A_SP1 * SP1_raw + B_SP1;
SP2 = A_SP2 * SP2_raw + B_SP2;
SP3 = A_SP3 * SP3_raw + B_SP3;
SP4 = A_SP4 * SP4_raw + B_SP4;
```

Gambar 42. Kode program hasil regresi linier

Hasil pada Gambar 43 menunjukkan grafik perbandingan nilai RMSE dan akurasi modul ADC ADS1115 pada setiap probe pengukuran Self Potential, yaitu SP1 hingga SP4. Berdasarkan hasil pengujian, nilai RMSE yang diperoleh pada seluruh probe masih tergolong sangat kecil, di mana nilai RMSE terendah sebesar 0,0500 mV terdapat pada probe SP3, sedangkan nilai RMSE tertinggi sebesar 0,0577 mV terdapat pada probe SP1. Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa selisih antara hasil pembacaan ADC ADS1115 terhadap nilai referensi multimeter digital tidak terlalu besar, sehingga hasil pengukuran yang diperoleh dapat dikatakan cukup baik dan stabil.

Selain itu, hasil pengujian akurasi menunjukkan bahwa seluruh probe pengukuran memiliki tingkat akurasi di atas 99%. Nilai akurasi tertinggi sebesar 99,25% diperoleh pada probe SP3, sedangkan nilai akurasi terendah sebesar 99,13% terdapat pada probe SP1. Perbedaan nilai akurasi antar probe relatif kecil, sehingga menunjukkan bahwa performa pembacaan pada setiap probe pengukuran bekerja secara konsisten dan tidak memiliki perbedaan pembacaan yang signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modul ADC ADS1115 mampu membaca sinyal

beda potensial Self Potential dalam orde milivolt dengan tingkat ketelitian dan kestabilan yang baik setelah dilakukan proses kalibrasi regresi linier.



Gambar 43. Grafik Perbandingan RMSE dan Akurasi Modul ADC ADS1115

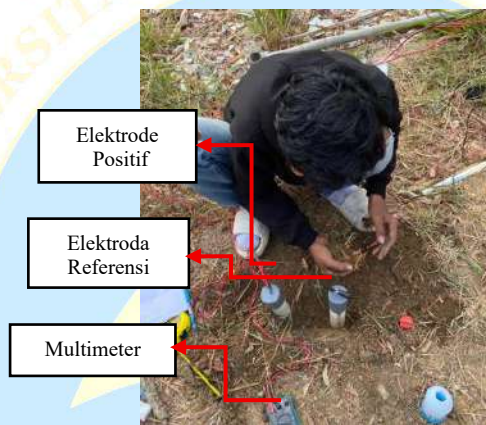
2. Hasil Uji Elektroda Poropspot

Uji elektroda poruspot dilakukan untuk mengetahui kualitas dan kestabilan elektroda yang digunakan pada sistem pengukuran *Self Potential*. Pengujian dilakukan menggunakan 5 elektroda poruspot yang terdiri dari 1 elektroda referensi negatif dan 4 elektroda pengukuran positif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 44. Sebelum digunakan pada pengukuran lapangan, setiap elektroda terlebih dahulu diuji untuk memastikan nilai beda potensial antar elektroda berada pada rentang ± 5 mV. Pengujian ini dilakukan agar seluruh elektroda memiliki kondisi pembacaan yang relatif sama sehingga hasil pengukuran *Self Potential* menjadi lebih stabil dan konsisten.

Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan elektroda referensi sebagai titik acuan pengukuran, sedangkan elektroda positif digunakan untuk membaca nilai beda potensial pada masing-masing probe pengukuran SP1 hingga SP4. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh elektroda mampu menghasilkan pembacaan yang relatif stabil dengan perubahan nilai yang tidak terlalu signifikan selama proses pengukuran berlangsung. Apabila terdapat elektroda yang memiliki selisih nilai melebihi batas yang ditentukan, maka dilakukan penyesuaian dengan

cara menambahkan atau mengurangi larutan CuSO_4 hingga nilai pembacaan antar elektroda mendekati sama.

Kestabilan pembacaan dipengaruhi oleh penggunaan larutan CuSO_4 sebagai elektrolit dan lapisan berpori pada ujung elektroda yang membantu menjaga kelembapan selama proses pengukuran. Selain itu, penggunaan batang tembaga sebagai konduktor membantu proses penghantaran sinyal dari elektroda menuju sistem pembacaan. Selama pengujian berlangsung, pembacaan pada setiap elektroda tidak menunjukkan gangguan maupun fluktuasi yang signifikan, sehingga elektroda poruspot yang dirancang dinilai mampu bekerja dengan baik dan layak digunakan pada proses pengukuran *Self Potential* di lapangan.



Gambar 44. Dokumentasi uji elektroda poruspot

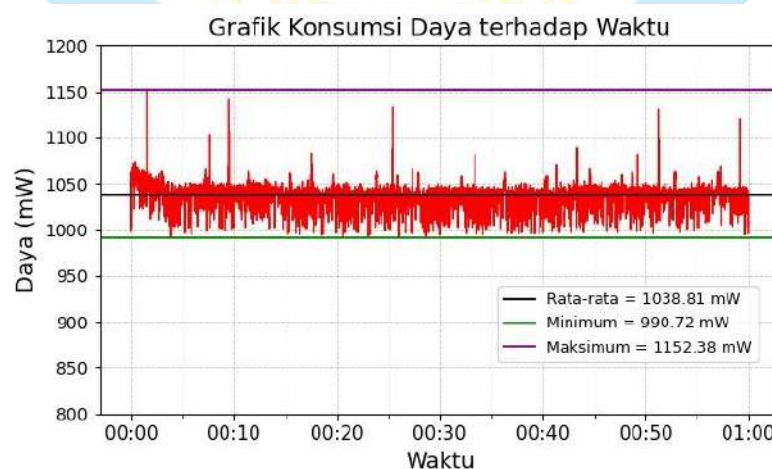
3. Hasil Konsumsi Daya

Berdasarkan hasil pengujian konsumsi daya, alat ukur *Self Potential* diuji menggunakan baterai 12 Volt 8 Ah sebagai sumber daya untuk mengetahui besar daya yang digunakan selama sistem beroperasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 45. Pengukuran konsumsi daya pada sistem dilakukan menggunakan alat ukur *volt current* meter untuk memperoleh nilai tegangan dan arus selama proses pengujian berlangsung. Baterai yang digunakan memiliki total energi sebesar 96 Wh, dengan asumsi energi yang dapat dimanfaatkan sebesar 80% dari kapasitas total baterai. Nilai tegangan dan arus hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung konsumsi daya sistem menggunakan Persamaan (6), serta menghitung estimasi lama penggunaan perangkat menggunakan Persamaan (7) selama proses monitoring berlangsung.



Gambar 45. Alat ukur *volt current* meter untuk pengujian konsumsi daya

Berdasarkan hasil pengujian konsumsi daya yang ditunjukkan pada Gambar 46, perangkat monitoring *Self Potential* memiliki nilai konsumsi daya yang relatif stabil selama proses pengujian berlangsung selama 1 jam. Pengukuran dilakukan menggunakan *volt current* meter untuk memperoleh nilai tegangan dan arus, kemudian dihitung menjadi nilai daya. Dari hasil pengujian diperoleh nilai rata-rata konsumsi daya sebesar 1038,81 mW, dengan nilai minimum sebesar 990,72 mW dan nilai maksimum sebesar 1152,38 mW. Grafik menunjukkan bahwa konsumsi daya sistem cenderung berada di sekitar nilai rata-rata meskipun terdapat beberapa kenaikan daya sesaat selama perangkat beroperasi. Baterai yang digunakan memiliki kapasitas energi sebesar 96 Wh, dengan asumsi energi yang dapat dimanfaatkan sebesar 80% atau sekitar 76,8 Wh. Berdasarkan perhitungan estimasi lama penggunaan menggunakan Persamaan (7), perangkat diperkirakan dapat beroperasi selama sekitar 73,93 jam atau sekitar 3 hari penggunaan sebelum baterai mencapai batas penggunaan yang ditentukan.



Gambar 46. Hasil Pengujian Konsumsi Daya Selama 1 Jam

F. Hasil Uji Keseluruhan Sistem

Hasil uji keseluruhan sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen pada alat ukur *Self Potential* dapat bekerja secara terintegrasi sesuai dengan perancangan *firmware*. Pengujian meliputi proses aktivasi sistem, inisialisasi modul, pengecekan setiap komponen, pengambilan data, hingga proses penyimpanan hasil pengukuran ke media penyimpanan.

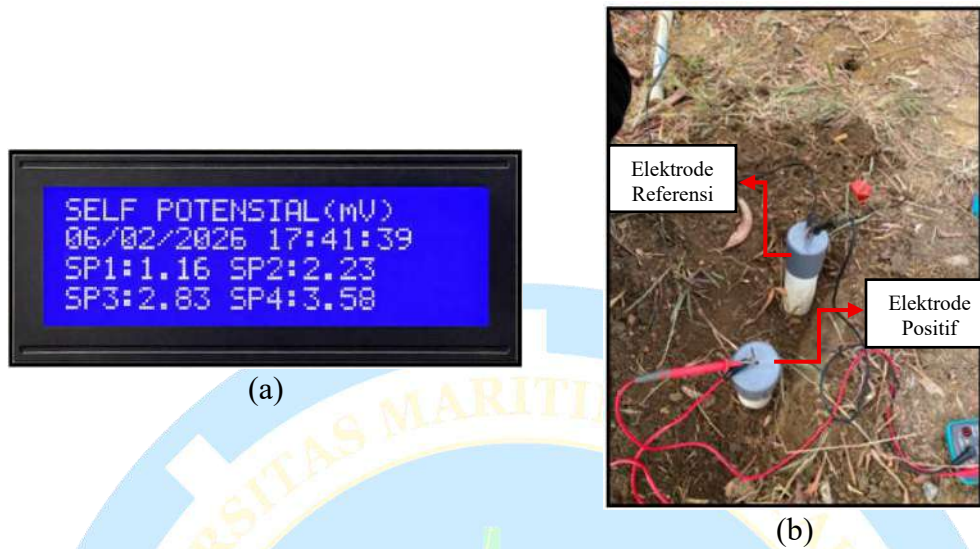
Pengujian diawali dengan menyalakan alat melalui saklar utama. Setelah sistem aktif, *firmware* secara otomatis melakukan proses inisialisasi pada seluruh komponen, meliputi LCD 20×4, modul ADC ADS1115, modul SD Card, dan modul GPS. Berdasarkan hasil pengujian, sistem dapat menyala dan beroperasi secara normal tanpa mengalami gangguan seperti mati mendadak maupun *restart* selama proses pengujian berlangsung. LCD 20×4 berhasil menampilkan informasi sistem sesuai program, modul ADC ADS1115 dapat terdeteksi dan berkomunikasi dengan ESP32 secara normal, serta modul SD Card berhasil terbaca dan siap digunakan untuk menyimpan data hasil pengukuran.

Proses berikutnya dilakukan pada modul GPS untuk memperoleh status fix sebelum pengukuran dimulai. Selama GPS masih mencari sinyal satelit, LED merah menyala sebagai indikator bahwa sistem belum siap melakukan pengukuran. Setelah GPS berhasil memperoleh fix, LED hijau menyala sebagai tanda bahwa sistem telah siap digunakan untuk proses pengambilan data.

Sistem kemudian melakukan pembacaan data *Self Potential* secara diferensial menggunakan probe referensi negatif dan probe pengukuran positif SP1 hingga SP4. Hasil pembacaan ditampilkan secara *real-time* melalui Serial Monitor dan LCD 20×4 sehingga pengguna dapat memantau nilai pengukuran secara langsung di lapangan. Tampilan hasil uji keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 47(a) yang menunjukkan informasi waktu dan lokasi pengukuran, sedangkan Gambar 47(b) menunjukkan dokumentasi proses pengukuran *Self Potential* di lapangan.

Seluruh data hasil pengukuran kemudian disimpan secara otomatis ke dalam SD Card sesuai alur kerja *firmware* yang telah dirancang. Proses pembacaan dan penyimpanan data berlangsung terus selama alat dalam kondisi menyala. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, seluruh komponen sistem dapat

bekerja secara stabil dan terintegrasi dengan baik, sehingga uji keseluruhan sistem dinyatakan berhasil.



Gambar 47. Hasil Uji Keseluruhan Sistem

G. Hasil Uji Lapangan

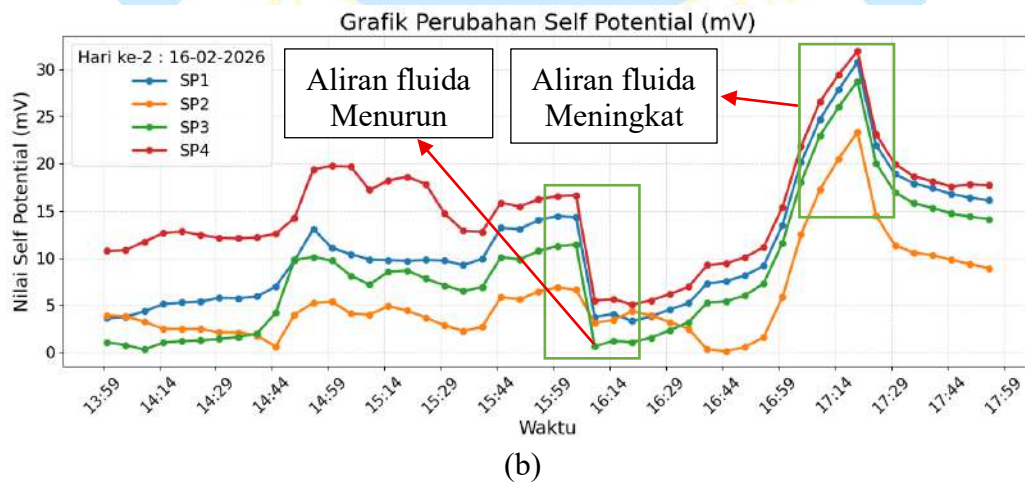
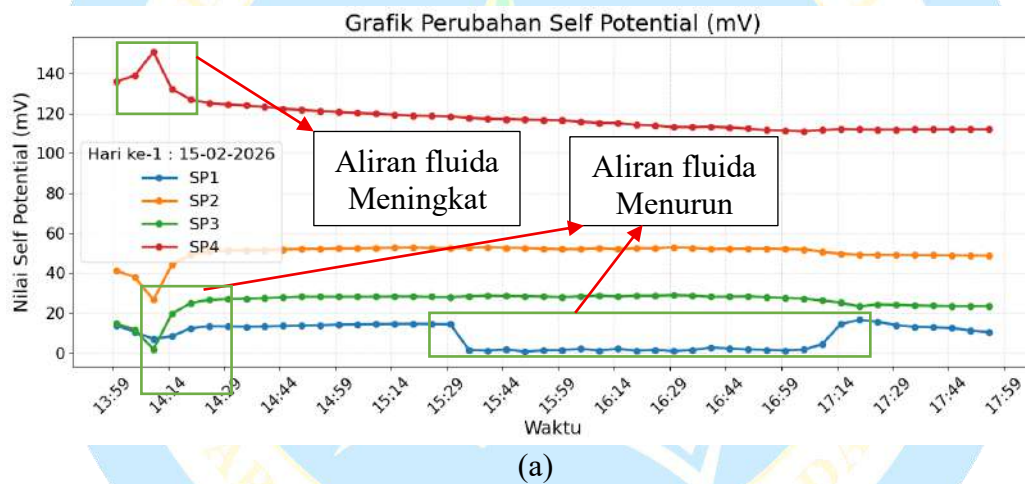
1. Hasil Pengujian Tanah Bauksit

Hasil pengujian pada tanah bauksit menunjukkan bahwa sistem mampu merekam perubahan nilai *Self Potential* (SP) dengan cukup jelas pada setiap titik pengukuran. Pada Gambar 48 (a) untuk hari pertama (15-02-2026), terlihat bahwa nilai SP4 cukup tinggi di awal, kemudian perlahan menurun seiring waktu. Penurunan ini menandakan bahwa aliran fluida mulai berkurang dan distribusi ion di dalam tanah menjadi lebih merata. Sementara itu, SP1, SP2, dan SP3 cenderung lebih rendah dan relatif stabil, hanya terdapat sedikit perubahan di beberapa titik waktu. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi tanah yang masih kering membuat pergerakan fluida di dalam tanah tidak terlalu aktif.

Hasil pada hari kedua yang ditunjukkan pada Gambar 48 (b) (16-02-2026), perubahan nilai SP terlihat lebih jelas dan cukup signifikan. Beberapa titik seperti SP3 dan SP4 mengalami kenaikan yang cukup tajam pada waktu tertentu, yang menunjukkan adanya peningkatan aliran fluida di dalam tanah. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya kadar air, sehingga ion lebih mudah bergerak dan menghasilkan perubahan potensial yang lebih besar. Setelah mencapai

puncak, nilai SP kembali menurun, yang menandakan bahwa kondisi mulai kembali stabil dan aliran fluida berkurang.

Sedangkan pada hari ketiga Gambar 48 (c), (17-02-2026), pola yang terlihat lebih cenderung stabil dibandingkan hari kedua. SP3 dan SP4 masih menunjukkan peningkatan secara perlahan, sementara SP1 dan SP2 justru mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa aliran fluida mulai berkurang kembali dan distribusi ion di dalam tanah semakin merata. Tidak terlihat adanya lonjakan yang tajam seperti hari sebelumnya, sehingga kondisi tanah bisa dikatakan lebih stabil dan perubahan yang terjadi tidak terlalu ekstrem. Keseluruhan data hasil pengukuran *Self Potential* (SP) pada setiap titik dan waktu pengamatan dapat dilihat secara lengkap pada Lampiran 5, sedangkan dokumentasi proses pengambilan data di lapangan dapat dilihat pada Lampiran 6.





(c)

Gambar 48. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3

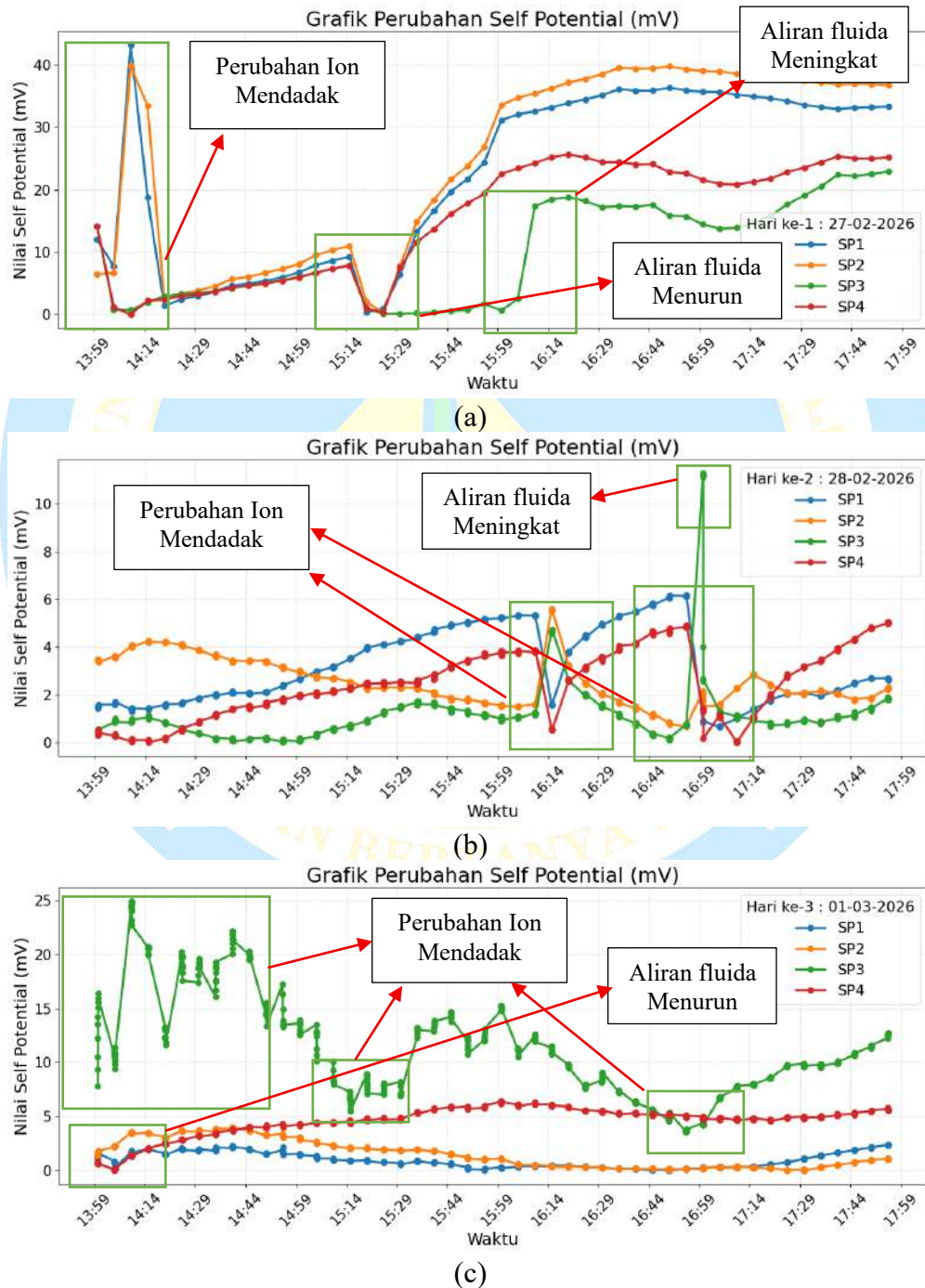
2. Hasil Pengujian Tanah Pesisir

Hasil pengujian pada tanah pesisir menunjukkan bahwa perubahan nilai *Self Potential* (SP) yang terjadi cenderung lebih fluktuatif dibandingkan dengan tanah bauksit. Pada Gambar 49 (a) untuk hari pertama (27-02-2026), terlihat adanya perubahan nilai yang cukup drastis di awal pengamatan, terutama pada SP1 dan SP2 yang sempat mengalami lonjakan kemudian turun dengan cepat. Kondisi ini menunjukkan adanya perubahan ion secara mendadak yang kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi tanah yang masih belum stabil. Setelah itu, nilai SP kembali meningkat secara bertahap, yang menandakan aliran fluida mulai meningkat dan ion bergerak lebih aktif di dalam tanah.

Hasil pada hari kedua yang ditunjukkan pada Gambar 49 (b) (28-02-2026), perubahan nilai SP terlihat lebih tidak stabil dengan beberapa lonjakan tajam pada waktu tertentu. SP3 mengalami peningkatan yang cukup signifikan dalam waktu singkat, yang mengindikasikan adanya peningkatan aliran fluida secara tiba-tiba. Namun setelah itu, nilai kembali menurun, menunjukkan bahwa kondisi kembali berubah dan aliran fluida tidak berlangsung secara terus-menerus. Pola ini menunjukkan bahwa tanah pesisir memiliki respon yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan, terutama terkait kadar air dan kandungan garam.

Sedangkan pada hari ketiga Gambar 49 (c), (01-03-2026), perubahan nilai SP masih menunjukkan fluktuasi, namun cenderung lebih stabil dibandingkan hari kedua. SP3 terlihat cukup dominan dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan titik lainnya, meskipun tetap mengalami naik turun. Sementara itu, SP1 dan SP2

relatif lebih rendah dan tidak mengalami perubahan yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun masih terjadi pergerakan ion, aliran fluida di dalam tanah mulai menurun dan sistem menjadi lebih stabil dibandingkan sebelumnya. keseluruhan data hasil pengukuran *Self Potential* (SP) pada setiap titik dan waktu pengamatan dapat dilihat secara lengkap pada Lampiran 5, sedangkan dokumentasi proses pengambilan data di lapangan dapat dilihat pada Lampiran 7.



Gambar 49. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3

3. Hasil Uji Statistik Deskriptif Tanah Bauksit

Hasil pada Tabel 11 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-1 pada tanah bauksit, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP4 sebesar 118,04 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP1 sebesar 8,39 mV. Hal ini menunjukkan bahwa SP4 merupakan titik dengan nilai *Self Potential* paling dominan, sementara SP1 memiliki nilai paling rendah. SP2 dan SP3 berada pada kategori menengah dengan nilai masing-masing sebesar 50,24 mV dan 25,78 mV, yang menunjukkan adanya perbedaan distribusi potensial pada setiap titik pengukuran.

Nilai median menunjukkan bahwa SP4 memiliki nilai tengah sebesar 116,41 mV yang mendekati nilai rata-ratanya, sehingga distribusi datanya cukup konsisten. SP2 dan SP3 juga memiliki median yang relatif dekat dengan nilai mean, sedangkan SP1 memiliki median sedikit lebih tinggi dari rata-ratanya yang mengindikasikan distribusi data yang tidak sepenuhnya simetris. Secara umum, kedekatan nilai mean dan median menunjukkan bahwa penyebaran data relatif stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh nilai ekstrem.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP4 memiliki fluktuasi paling tinggi sebesar 7,88, sedangkan SP2 merupakan titik paling stabil dengan nilai 4,47. Nilai range terbesar terdapat pada SP4 sebesar 40,14 mV, sementara SP1 memiliki rentang paling kecil yaitu 16,06 mV. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun SP4 memiliki nilai paling dominan, tingkat variasinya juga lebih besar dibandingkan titik lainnya.

Tabel 11. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-1

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	8,388408163	50,24091837	25,78387755	118,0414286
Median	10,63	52,005	28	116,415
Standard Deviation	5,819452317	4,471685446	4,855789965	7,878409003
Range	16,06	26,7	27,45	40,14
Minimum	0,62	26,18	1,52	110,89
Maximum	16,68	52,88	28,97	151,03

Hasil pada Tabel 12 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-2 pada tanah bauksit, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP4 sebesar 15,04 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP2 sebesar 5,84 mV. SP1 dan

SP3 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar 11,19 mV dan 8,68 mV, yang menunjukkan bahwa distribusi nilai *Self Potential* pada hari kedua cenderung lebih rendah dibandingkan hari pertama serta lebih merata antar titik pengukuran.

Nilai median menunjukkan bahwa SP4 memiliki nilai tengah sebesar 15,38 mV yang sangat dekat dengan nilai rata-ratanya, sehingga distribusi datanya dapat dikatakan cukup konsisten. SP1 dan SP3 juga memiliki nilai median yang tidak jauh berbeda dari nilai mean, sedangkan SP2 menunjukkan selisih yang lebih kecil antara median dan rata-rata. Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum data pada hari kedua relatif stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh nilai ekstrem.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP3 memiliki fluktuasi terbesar sebesar 6,89, sedangkan SP2 merupakan titik yang paling stabil dengan nilai 4,97. Nilai range terbesar terdapat pada SP3 sebesar 28,72 mV, sementara SP2 memiliki rentang paling kecil yaitu 23,55 mV. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai rata-rata pada hari kedua relatif lebih rendah, variasi data masih terjadi terutama pada SP3 yang menunjukkan perubahan nilai yang cukup dinamis dibandingkan titik lainnya.

Tabel 12. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-2

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	11,19482	5,837612	8,680673	15,03667
Median	9,775	4,06	7,82	15,385
Standard Deviation	6,499731	4,973478	6,888338	5,79716
Range	27,76	23,55	28,72	27,16
Minimum	3,3	0,04	0,25	5,04
Maximum	31,06	23,59	28,97	32,2

Hasil pada Tabel 13 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-3 pada tanah bauksit, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP3 sebesar 37,79 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP2 sebesar 14,91 mV. SP4 dan SP1 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar 33,51 mV dan 20,04 mV, yang menunjukkan bahwa distribusi nilai *Self Potential* pada hari ketiga kembali meningkat dibandingkan hari sebelumnya, terutama pada SP3 dan SP4.

Nilai median menunjukkan bahwa SP3 dan SP4 memiliki nilai tengah yang relatif dekat dengan nilai rata-ratanya, yaitu masing-masing sebesar 43,14 mV dan

37,86 mV, sehingga distribusi datanya masih tergolong konsisten. SP1 dan SP2 juga menunjukkan selisih yang tidak terlalu besar antara median dan mean, yang mengindikasikan bahwa penyebaran data pada hari ketiga relatif stabil tanpa adanya pengaruh nilai ekstrem yang signifikan.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP3 memiliki fluktuasi terbesar sebesar 11,11, sedangkan SP2 merupakan titik paling stabil dengan nilai 2,39. Nilai range terbesar juga terdapat pada SP3 sebesar 32,57 mV, sementara SP2 memiliki rentang paling kecil yaitu 14,36 mV. Hal ini menunjukkan bahwa SP3 mengalami variasi nilai yang cukup besar dibandingkan titik lainnya, meskipun secara umum kondisi pada hari ketiga cenderung lebih stabil dibandingkan sebelumnya.

Tabel 13. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Bauksit Hari Ke-3

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	20,03763	14,90978	37,79171	33,51069
Median	22,14	15,605	43,135	37,86
Standard Deviation	4,131801	2,394821	11,10748	7,101303
Range	15,23	14,36	32,57	19
Minimum	10,46	9,64	20,59	22,46
Maximum	25,69	24	53,16	41,46

4. Hasil Uji Statistik Deskriptif Tanah Pesisir

Hasil pada Tabel 14 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-1 pada tanah pesisir, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP2 sebesar 24,92 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP3 sebesar 10,28 mV. SP1 dan SP4 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar 22,53 mV dan 15,43 mV, yang menunjukkan bahwa distribusi nilai *Self Potential* pada tanah pesisir cenderung lebih merata, meskipun tetap dipengaruhi oleh kandungan ion dan kadar garam yang tinggi.

Nilai median menunjukkan bahwa SP1 dan SP2 memiliki nilai tengah yang lebih tinggi dibandingkan nilai rata-ratanya, yaitu masing-masing sebesar 32,55 mV dan 34,81 mV, yang mengindikasikan adanya kecenderungan distribusi data yang tidak simetris. Sementara itu, SP3 dan SP4 memiliki median yang relatif lebih dekat dengan nilai mean, sehingga distribusinya cenderung lebih stabil. Perbedaan ini

menunjukkan bahwa beberapa titik pengukuran pada tanah pesisir dipengaruhi oleh nilai ekstrem yang cukup besar.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP2 memiliki fluktuasi terbesar sebesar 15,19, diikuti oleh SP1 sebesar 14,45, sedangkan SP3 merupakan titik yang paling stabil dengan nilai 9,09. Nilai range terbesar terdapat pada SP4 sebesar 103,58 mV, diikuti oleh SP3 sebesar 101,73 mV, yang menunjukkan adanya variasi nilai yang sangat tinggi pada titik tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah pesisir memiliki karakteristik yang sangat dinamis akibat pengaruh kadar air dan kandungan garam, sehingga perubahan nilai Self Potential cenderung lebih fluktuatif dibandingkan tanah bauksit.

Tabel 14. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-1

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	22,53116	24,92343	10,27551	15,43082
Median	32,545	34,81	7,335	20,875
Standard Deviation	14,45314	15,1921	9,090817	10,33706
Range	86,07	58,07	101,73	103,58
Minimum	0,05	0,04	0,01	0
Maximum	86,12	58,11	101,74	103,58

Hasil pada Tabel 15 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-2 pada tanah pesisir, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP1 sebesar 3,15 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP3 sebesar 1,19 mV. SP2 dan SP4 memiliki nilai rata-rata yang hampir sama, masing-masing sebesar 2,52 mV dan 2,50 mV. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *Self Potential* pada hari kedua cenderung lebih rendah dibandingkan hari pertama, serta distribusinya lebih merata pada setiap titik pengukuran.

Nilai median menunjukkan bahwa seluruh titik memiliki nilai yang cukup dekat dengan rata-ratanya, seperti SP1 sebesar 2,64 mV, SP2 sebesar 2,29 mV, SP3 sebesar 0,98 mV, dan SP4 sebesar 2,51 mV. Kedekatan antara nilai mean dan median ini mengindikasikan bahwa distribusi data relatif stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh nilai ekstrem. Hal ini juga menunjukkan bahwa kondisi tanah pesisir pada hari kedua cenderung lebih homogen dibandingkan hari sebelumnya.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP1 memiliki fluktuasi terbesar sebesar 1,59, sedangkan SP2 merupakan titik paling stabil dengan nilai 0,98. Nilai

range terbesar terdapat pada SP3 sebesar 11,27 mV, yang menunjukkan adanya variasi nilai yang cukup signifikan pada titik tersebut. Sementara itu, SP2 memiliki rentang paling kecil yaitu 4,96 mV, sehingga perubahan nilainya lebih terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun nilai rata-rata relatif rendah, variasi lokal masih terjadi pada beberapa titik pengukuran, terutama pada SP3.

Tabel 15. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-2

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	3,147714	2,51798	1,192041	2,504714
Median	2,64	2,29	0,975	2,51
Standard Deviation	1,592646	0,983239	1,438534	1,500678
Range	5,55	4,96	11,27	5,33
Minimum	0,64	0,66	0,02	0
Maximum	6,19	5,62	11,29	5,33

Hasil pada Tabel 16 menunjukkan analisis statistik deskriptif hari ke-3 pada tanah pesisir, di mana nilai rata-rata (*mean*) tertinggi terdapat pada SP3 sebesar 11,47 mV, sedangkan yang terendah terdapat pada SP1 sebesar 0,99 mV. SP4 dan SP2 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar 4,60 mV dan 1,48 mV. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *Self Potential* pada hari ketiga cenderung tidak merata, dengan dominasi yang cukup jelas pada titik SP3 dibandingkan titik lainnya.

Nilai median menunjukkan bahwa seluruh titik memiliki nilai yang relatif dekat dengan rata-ratanya, seperti SP3 sebesar 10,85 mV dan SP4 sebesar 4,87 mV, sehingga distribusi data dapat dikatakan cukup stabil. SP1 dan SP2 juga menunjukkan selisih yang kecil antara median dan mean, yang mengindikasikan bahwa penyebaran data tidak terlalu dipengaruhi oleh nilai ekstrem.

Nilai standar deviasi menunjukkan bahwa SP3 memiliki fluktuasi terbesar sebesar 4,65, sedangkan SP1 merupakan titik paling stabil dengan nilai 0,73. Nilai range terbesar juga terdapat pada SP3 sebesar 21,33 mV, yang menunjukkan adanya variasi nilai yang cukup tinggi pada titik tersebut. Sementara itu, SP1 memiliki rentang paling kecil yaitu 2,44 mV, sehingga perubahan nilainya lebih terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar titik relatif stabil, SP3 masih mengalami dinamika perubahan yang lebih signifikan dibandingkan titik lainnya.

Tabel 16. Analisis Statistik Deskriptif Tanah Pesisir Hari Ke-3

Parameter	SP1(mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Mean	0,991061	1,483673	11,46512	4,600857
Median	0,8	1,08	10,85	4,87
Standard Deviation	0,726046	1,282963	4,650697	1,,362099
Range	2,44	4,01	21,33	6,39
Minimum	0	0	3,58	0,01
Maximum	2,44	4,01	24,91	6,4

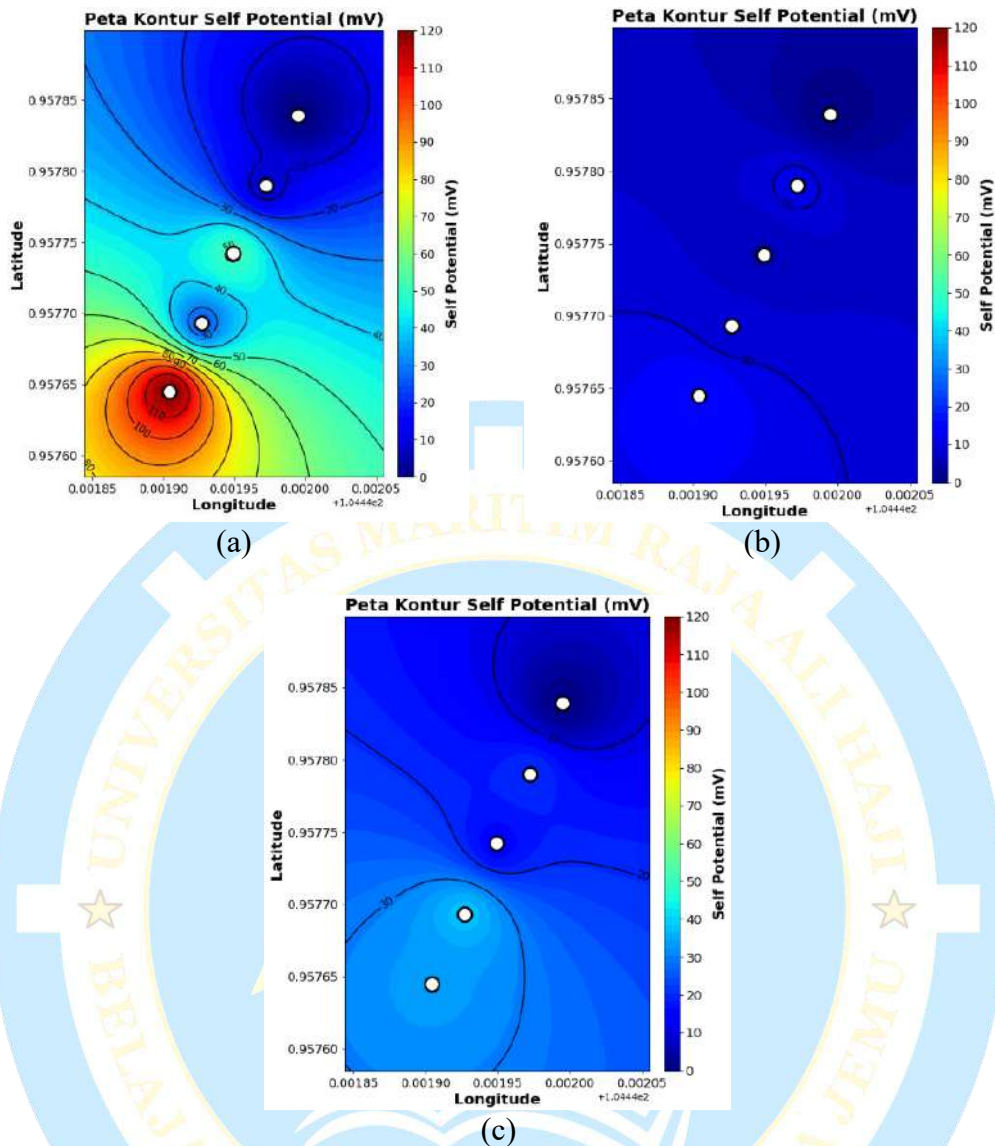
5. Hasil Peta Kontur Tanah Bauksit

Pengujian *Self Potential* (SP) pada tanah bauksit dilakukan pada beberapa titik pengukuran yang ditentukan berdasarkan koordinat geografis. Titik pengukuran disusun dalam satu lintasan dengan jarak yang relatif sama, dimulai dari SPref pada koordinat 0.957839; 104.441995, kemudian diikuti oleh SP1 pada 0.957790; 104.441972, SP2 pada 0.957742; 104.441949, SP3 pada 0.957693; 104.441927, dan SP4 pada 0.957645; 104.441904.

Berdasarkan hasil pada Gambar 50, terlihat bahwa distribusi nilai *Self Potential* pada setiap hari menunjukkan pola yang berbeda. Pada Gambar 48 (a) untuk hari ke-1, terlihat perbedaan warna yang cukup mencolok pada peta kontur. Warna merah menunjukkan nilai potensial yang lebih tinggi yang terkonsentrasi pada salah satu titik, sedangkan warna biru menunjukkan nilai yang lebih rendah di titik lainnya. Hal ini menandakan bahwa distribusi potensial belum merata dan masih terpusat pada area tertentu.

Hasil pada Gambar 50 (b) untuk hari ke-2, nilai potensial terlihat lebih rendah dan didominasi warna biru pada hampir seluruh titik pengukuran. Perubahan warna antar titik tidak terlalu kontras dibandingkan hari pertama, yang menunjukkan bahwa distribusi potensial menjadi lebih merata di sepanjang lintasan.

Sedangkan pada Gambar 50 (c) untuk hari ke-3, pola distribusi mulai menunjukkan perubahan kembali. Warna biru masih mendominasi, namun mulai terlihat perubahan menuju warna yang lebih tinggi pada beberapa titik. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan nilai potensial, meskipun tidak terlalu signifikan dan cenderung stabil.



Gambar 50. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3

6. Hasil Peta Kontur Tanah Pesisir

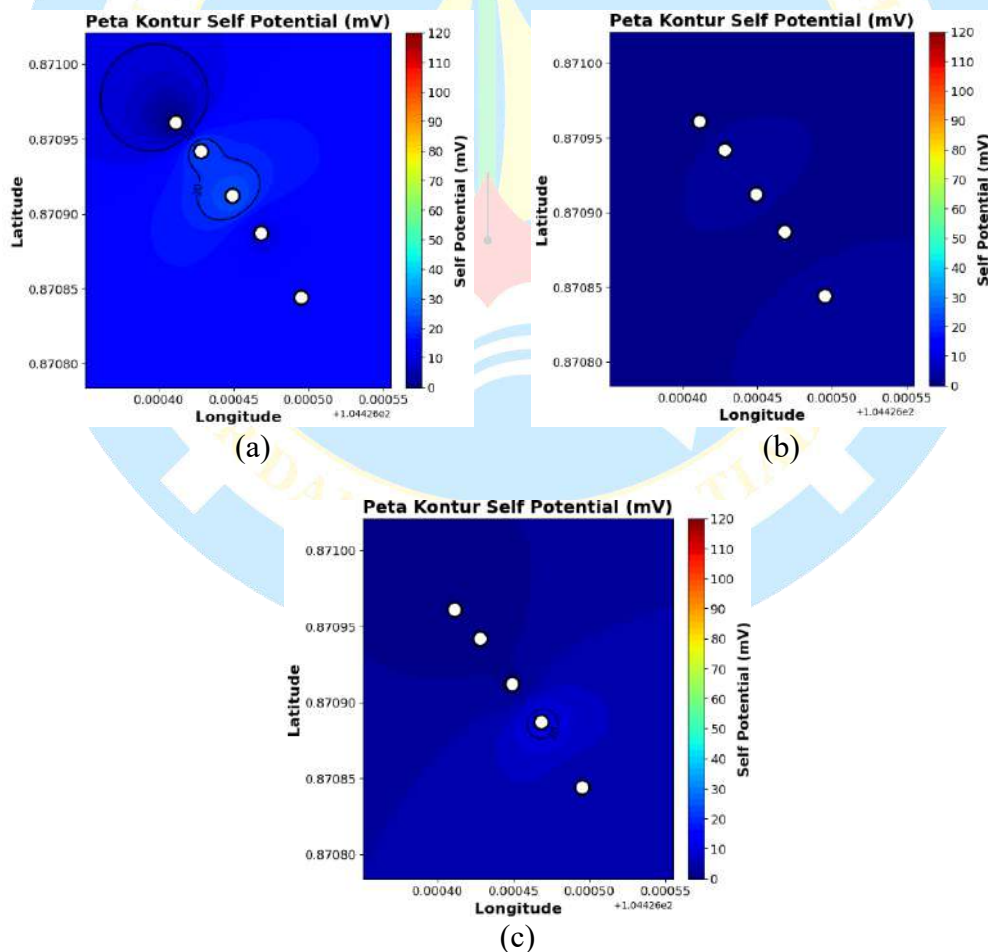
Pengujian *Self Potential* (SP) pada tanah pesisir dilakukan pada area yang berada di wilayah pantai dengan karakteristik dominan berupa pasir dan material sedimen halus. Titik pengukuran ditentukan berdasarkan koordinat geografis (lintang dan bujur) dengan lima titik yang disusun membentuk satu lintasan relatif lurus dan berjarak seragam, sehingga perubahan nilai potensial dapat diamati dengan lebih jelas pada setiap waktu pengukuran.

Hasil pada Gambar 51 (a) untuk hari ke-1 menunjukkan adanya perbedaan warna yang cukup jelas pada peta kontur. Warna merah menunjukkan nilai potensial yang lebih tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan nilai yang lebih

rendah. Perbedaan ini menandakan bahwa distribusi potensial di sepanjang lintasan tidak merata, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi awal tanah pada saat pengukuran dilakukan.

Hasil pada Gambar 51 (b) untuk hari ke-2, perubahan nilai terlihat lebih bertahap dari satu titik ke titik lainnya. Warna pada kontur menunjukkan pergeseran nilai potensial yang cukup jelas, yang mengindikasikan adanya perubahan distribusi ion di dalam tanah dibandingkan hari sebelumnya. Nilai potensial terlihat lebih menyebar dan tidak terfokus hanya pada satu titik.

Sedangkan pada Gambar 51 (c) untuk hari ke-3, pola warna pada kontur menunjukkan kecenderungan perubahan yang lebih stabil. Warna merah dan biru masih terlihat, namun perubahan yang terjadi tidak terlalu drastis. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi potensial mulai lebih merata dibandingkan hari ke-1 dan hari ke-2.



Gambar 51. (a) Hari Ke-1, (b) Hari Ke-2, (c) Hari Ke-3

H. Analisis Delta SP Tanah Bauksit dan Tanah Pesisir

Tabel 21 dan Tabel 22 menunjukkan hasil perhitungan Delta *Self Potential* (ΔSP) pada media tanah bauksit dan pesisir selama 3 hari pengamatan. Perhitungan nilai ΔSP dilakukan menggunakan nilai elektroda referensi sebesar 0 mV dan nilai hasil pengukuran pada setiap titik pengamatan. Persamaan perhitungan Delta *Self Potential* dapat dilihat pada Persamaan (8).

$$\Delta SP = SP_i - SP_{ref} \quad (8)$$

Keterangan:

ΔSP = Delta Self Potential (mV)

$SP_{referensi}$ = Nilai elektroda referensi (mV)

SP_{titik} = Nilai pengukuran pada titik pengamatan (mV)

Pengukuran dilakukan pada setiap probe pengukuran SP1 hingga SP4 untuk melihat perubahan nilai beda potensial pada masing-masing media pengujian selama proses pengambilan data berlangsung. Nilai ΔSP diperoleh dari selisih antara probe pengukuran positif terhadap probe referensi negatif pada sistem *Self Potential*. Berdasarkan hasil pengukuran pada media tanah bauksit, nilai ΔSP yang diperoleh cenderung lebih besar dibandingkan media tanah pesisir. Nilai tertinggi pada tanah bauksit terdapat pada probe SP4 di hari pertama sebesar 118,0414 mV, sedangkan probe lainnya juga menunjukkan perubahan nilai yang cukup signifikan selama 3 hari pengukuran. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tanah bauksit memiliki respon beda potensial yang lebih tinggi pada pengukuran *Self Potential*.

Sementara itu, hasil pengukuran pada media tanah pesisir menunjukkan nilai ΔSP yang relatif lebih kecil dibandingkan tanah bauksit. Nilai pengukuran pada tanah pesisir cenderung lebih stabil dengan perubahan yang tidak terlalu besar selama proses pengamatan berlangsung. Perbedaan nilai ΔSP pada kedua media tanah tersebut menunjukkan bahwa karakteristik tanah sangat mempengaruhi nilai beda potensial yang dihasilkan selama proses pengukuran *Self Potential* di lapangan. Nilai ΔSP yang lebih besar pada tanah bauksit diduga dipengaruhi oleh kondisi mineral dan kandungan material tanah yang memiliki respon kelistrikan lebih tinggi dibandingkan tanah pesisir berpasir.

Tabel 17. Hasil Perhitungan Delta SP pada Tanah Bauksit Selama 3 Hari

Hari	SP1 (mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Hari ke - 1	8,388408	50,240918	25,783878	118,0414
Hari ke - 2	11,194816	5,8376122	8,680673	15,03667
Hari ke - 3	20,03763	14,909776	37,791714	33,51069

Tabel 18. Hasil Perhitungan Delta SP pada Pesisir Selama 3 Hari

Hari	SP1 (mV)	SP2 (mV)	SP3 (mV)	SP4 (mV)
Hari ke - 1	22,531163	24,923429	10,27551	15,430816
Hari ke - 2	3,147714	2,5179796	1,1920408	2,5047143
Hari ke - 3	0,991061	1,483673	11,46512	4,6008571

I. Pembahasan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan pengambilan data yang telah dilakukan, sistem pengukuran *Self Potential* (SP) berbasis ESP32 dan ADC ADS1115 mampu bekerja dengan baik dalam membaca beda potensial listrik alami pada tanah. Sistem dapat melakukan pembacaan tegangan dalam orde milivolt secara otomatis dan kontinu pada setiap kanal pengukuran. Penggunaan modul ADC ADS1115 beresolusi 16-bit memberikan sensitivitas pembacaan yang cukup baik terhadap sinyal tegangan rendah sehingga proses akuisisi data dapat dilakukan dengan lebih stabil dibandingkan menggunakan ADC internal mikrokontroler. Kondisi ini sesuai dengan penelitian Antosia *et al.* yang menjelaskan bahwa ADC beresolusi tinggi mampu meningkatkan sensitivitas pembacaan tegangan kecil pada sistem akuisisi data digital [22].

Hasil kalibrasi alat terhadap multimeter digital menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi pengukuran yang tinggi dengan nilai akurasi di atas 99,25%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil pembacaan alat memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap nilai referensi pengukuran. Tingginya nilai akurasi dipengaruhi oleh kestabilan proses konversi ADC serta penggunaan elektroda Cu/CuSO₄ yang memiliki karakteristik non-polarisasi sehingga lebih sesuai digunakan pada pengukuran *Self Potential*. Selain itu, hasil regresi linier juga menunjukkan hubungan yang sangat baik antara tegangan referensi dan hasil pembacaan alat dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1. Menurut

Jamilludin *et al.* [15], pengukuran *Self Potential* membutuhkan sistem pembacaan yang sensitif dan stabil karena nilai potensial alami yang dihasilkan berada pada orde milivolt.

Hasil pengujian sistem menunjukkan bahwa alat mampu melakukan pengambilan data secara otomatis dan menyimpan hasil pengukuran ke microSD tanpa mengalami gangguan yang signifikan. Penggunaan ESP32 sebagai pengendali utama memberikan kemampuan pemrosesan data yang cukup cepat sehingga data hasil pembacaan dari modul ADS1115 dapat diproses dan disimpan secara otomatis. Sistem juga mampu menampilkan data secara *real-time* melalui LCD dan serial monitor sehingga mempermudah proses monitoring selama pengukuran berlangsung. Dengan adanya sistem otomatis ini, proses pencatatan data menjadi lebih efisien dibandingkan pengukuran manual menggunakan multimeter.

Selama proses pengukuran berlangsung, nilai *Self Potential* pada awal pembacaan masih mengalami perubahan sebelum akhirnya menjadi lebih stabil. Kondisi tersebut diduga terjadi karena elektroda masih menyesuaikan kondisi tanah di sekitar titik pengukuran. Saat elektroda pertama kali ditanam, kondisi ion dan kelembapan tanah di sekitar elektroda belum sepenuhnya stabil sehingga nilai potensial yang terbaca masih berubah-ubah. Setelah beberapa waktu, kondisi tanah mulai menyesuaikan sehingga nilai potensial menjadi lebih konstan. Menurut Jubaedah *et al.* [14], perubahan nilai potensial pada awal pengukuran merupakan karakteristik umum pada metode *Self Potential* yang dipengaruhi oleh distribusi ion dan kondisi elektrokimia tanah.

Hasil pengukuran pada media tanah bauksit menunjukkan nilai ΔSP yang relatif lebih besar dibandingkan tanah pesisir. Nilai ΔSP tertinggi terdapat pada probe SP4 di hari pertama sebesar 118,0414 mV, sedangkan pada tanah pesisir nilai ΔSP tertinggi sebesar 24,9234 mV pada probe SP2 di hari pertama. Nilai ΔSP yang bernilai positif menunjukkan bahwa potensial pada probe pengukuran positif lebih tinggi dibandingkan probe referensi negatif. Kondisi ini menandakan adanya perbedaan distribusi ion dan aktivitas elektrokimia di dalam tanah yang menghasilkan beda potensial alami selama proses pengukuran berlangsung.

Semakin besar nilai ΔSP yang diperoleh, maka semakin besar pula perbedaan potensial listrik alami yang terjadi pada medium tanah tersebut.

Nilai ΔSP yang lebih tinggi pada tanah bauksit menunjukkan bahwa medium tanah memiliki respon kelistrikan yang lebih aktif dibandingkan tanah pesisir pada lokasi pengukuran. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh kandungan mineral dan karakteristik material tanah bauksit yang mampu menghasilkan perbedaan potensial lebih besar selama proses pengukuran *Self Potential* berlangsung. Sementara itu, hasil pengukuran pada media pesisir menunjukkan nilai ΔSP yang relatif lebih kecil dan cenderung lebih stabil. Walaupun tanah pesisir memiliki kandungan garam dan kelembapan yang cukup tinggi, distribusi potensial yang terbentuk pada lintasan pengukuran tidak sebesar pada tanah bauksit.

Perbedaan karakteristik hasil pengukuran tersebut dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kandungan medium pada masing-masing jenis tanah. Tanah pesisir memiliki kandungan garam dan kelembapan yang lebih tinggi dibandingkan tanah bauksit sehingga konduktivitas listrik tanah menjadi lebih besar. Kandungan ion yang tinggi menyebabkan distribusi arus listrik alami di dalam tanah menjadi lebih aktif sehingga perubahan nilai potensial yang terukur menjadi lebih dinamis. Revil dan Jardani [16] menjelaskan bahwa kandungan ion, fluida, dan tingkat konduktivitas tanah memberikan pengaruh langsung terhadap nilai potensial alami yang dihasilkan pada metode *Self Potential*.

Analisis spasial pada titik SP1 hingga SP4 menunjukkan bahwa distribusi nilai potensial pada setiap titik pengukuran tidak tersebar secara merata. Beberapa titik memiliki nilai potensial yang lebih tinggi dibandingkan titik lainnya sehingga membentuk pola gradien potensial di sepanjang lintasan pengukuran. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan adanya variasi kondisi bawah permukaan pada masing-masing titik pengukuran. Menurut Wulandari [19], distribusi nilai *Self Potential* yang tidak homogen dapat digunakan untuk mengidentifikasi variasi kondisi medium bawah permukaan tanah. Selain itu, Grobbee et al. [18] menjelaskan bahwa gradien potensial pada metode *Self Potential* dapat digunakan untuk melihat arah pergerakan fluida serta distribusi ion di bawah permukaan.

Secara keseluruhan, sistem pengukuran *Self Potential* berbasis ESP32 dan ADC ADS1115 yang dikembangkan telah mampu bekerja sesuai dengan tujuan

penelitian. Sistem mampu melakukan pengukuran beda potensial listrik secara otomatis dengan tingkat akurasi yang tinggi, kestabilan pembacaan yang baik, serta mampu merekam data lapangan secara kontinu. Hasil pengukuran juga menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi perbedaan karakteristik potensial alami pada dua jenis tanah yang berbeda. Kondisi ini menunjukkan bahwa alat yang dikembangkan memiliki potensi untuk digunakan pada penelitian geofisika lingkungan dan pemantauan kondisi bawah permukaan tanah secara lebih efisien dibandingkan metode pengukuran manual [15].



BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran *Self Potential* (SP) berbasis mikrokontroler ESP32 dan modul ADC ADS1115 berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan baik. Sistem mampu membaca beda potensial dalam orde milivolt menggunakan konfigurasi pengukuran diferensial, serta menyimpan data secara otomatis ke dalam media penyimpanan.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa tingkat akurasi pengukuran berada di atas 99,25%, sehingga sistem dinyatakan memiliki tingkat ketelitian yang baik dan layak digunakan untuk pengambilan data lapangan. Pengujian kinerja alat juga menunjukkan bahwa seluruh komponen, mulai dari LCD, modul ADC, GPS, hingga SD Card, dapat berfungsi sesuai dengan perancangan firmware yang telah dibuat.

Pengujian lapangan yang dilakukan pada dua lokasi berbeda, yaitu tanah bauksit dan tanah pesisir berpasir, menunjukkan adanya perbedaan nilai *Self Potential* yang terukur. Hal ini membuktikan bahwa sistem mampu mendeteksi variasi karakteristik tanah berdasarkan distribusi beda potensial yang dihasilkan. Konfigurasi elektroda secara linear dengan jarak antar titik 5 meter juga mampu menampilkan gradien potensial secara spasial melalui grafik hasil pengukuran.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut, yaitu:

1. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan lebih banyak titik pengukuran agar distribusi potensial tanah dapat dipetakan secara lebih luas dan detail.
2. Penambahan fitur pengiriman data secara real-time berbasis IoT dapat dilakukan agar proses monitoring tidak hanya bergantung pada penyimpanan lokal di SD Card.

3. Pengujian dapat dilakukan pada lebih banyak variasi jenis tanah dan kondisi lingkungan untuk mengetahui performa sistem dalam skala yang lebih luas.
4. Penggunaan sistem proteksi tambahan terhadap gangguan cuaca dan kelembapan disarankan untuk meningkatkan keandalan alat dalam penggunaan jangka panjang.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Revil *et al.*, “Groundwater flow paths using combined self-potential, electrical resistivity, and induced polarization signals,” *Geophys. J. Int.*, vol. 239, no. 2, pp. 798–820, 2024, doi: 10.1093/gji/ggae291.
- [2] F. Fajriani, T. Andi Fadlly, and T. Harmawan, “Prediksi Penurunan Muka Tanah Melalui Pendugaan Potensi Air Tanah Menggunakan Metode Self-Potential,” *PHYDAGOGIC J. Fis. dan Pembelajarannya*, vol. 2, no. 2, pp. 49–54, 2020, doi: 10.31605/phy.v2i2.704.
- [3] M. Muhandi *et al.*, “Application of Self-Potential Method to Observe Groundwater Flow in Tanjungpura University Area, Pontianak,” *Indones. Rev. Phys.*, vol. 4, no. 2, pp. 17–22, 2021, doi: 10.12928/irip.v4i2.4020.
- [4] M. F. R. Hasan, T. W. Swastika, N. Martina, and L. S. Wulandari, “Identification of Groundwater Distribution Using Self Potential Method,” *Appl. Res. Civ. Eng. Environ.*, vol. 1, no. 01, pp. 16–23, 2019, doi: 10.32722/arcee.v1i01.1953.
- [5] A. Adriati, M. Muhandi, Y. Sutanto, Y. S. Putra, and R. Perdhana, “Sebaran Lindi Di Sekitar Tpa Batu Layang Pontianak Berdasarkan Nilai Self-Potential,” *J. Online Phys.*, vol. 8, no. 3, pp. 104–108, 2023, doi: 10.22437/jop.v8i3.27087.
- [6] D. Amelia, T. Asisah, I. Santya, T. Kusmita, and Y. Widyaningrum, “Identifikasi Ketidakstabilan Tanggul Waduk Desa Kemuja Kabupaten Bangka Menggunakan Metode Self-Potential (Sp),” *J. Online Phys.*, vol. 9, no. 2, pp. 23–29, 2024, doi: 10.22437/jop.v9i2.8266.
- [7] M. Rosno, M. Muhandi, and Z. Zulian, “Application of Self-Potential Method To Estimate Saltwater Distribution Around Brine Well in Manis Raya Village, Sintang Regency,” *J. Online Phys.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: 10.22437/jop.v10i1.35192.
- [8] S. Barde-Cabusson, A. Finizola, and N. Grobde, “A practical approach for self-potential data acquisition, processing, and visualization,” *Interpretation*, vol. 9, no. 1, pp. T123–T143, 2021, doi: 10.1190/INT-2020-0012.1.
- [9] M. A. Jamilludin, M. Kumalasari, and E. Minarto, “Analisa Distribusi Potensial dalam Tanah dengan Metode Self Potential,” *Res. Net*, no. May, pp. 1–7, 2020.
- [10] R. Fasya, “Penentuan Penyebaran Fluida Panas Menggunakan Metode Self Potential Di Desa Alue Canang Kabupaten Aceh Timur,” vol. 8, no. 2, pp. 1–6, 2023, doi: org/10.22437/jop.v8i2.20393.

- [11] M. Systems, "An Implementation Of A Compact Smart Resistive Sensor Based On A Microcontroller With An Internal Adc," vol. 23, no. 2, pp. 225–238, 2016, doi: 10.1515/mms-2016-0020.Unauthenticated.
- [12] T. N. Mallesh, S. A. Basha, P. A. Hussain, and ..., "Gps Controlled Environment Monitoring Robotic System Based on Iot," *J. Eng. ...*, vol. 14, no. 05, pp. 131–138, 2023, [Online]. Available: <https://jespublication.com/upload/2023-V14I5019>.
- [13] Z. Tsiropoulos, I. Gravalos, E. Skoubris, V. Poulek, T. Petřík, and M. Libra, "A Comparative Analysis Between Battery- and Solar-Powered Wireless Sensors for Soil Water Monitoring," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031130.
- [14] N. E. Jubaedah and W. W. Parnadi, "Study of Fluid Flow Movement by Using Self Potential Data," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 873, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/873/1/012082.
- [15] E. M. M. Jamilludin, M. Kumalasari, "Analisa Distribusi Potensial dalam Tanah dengan Metode Self Potential," *Res. Net*, vol. 0111164000, no. 29 may, pp. 1–7, 2020, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/341742355%0D//www.researchgate.net/publication/341742355%0D>
- [16] A. Revil and A. Jardani, *The self-potential method: Theory and applications in environmental geosciences*, vol. 9781107019. 2010. doi: 10.1017/CBO9781139094252.
- [17] jean-paul D. Abderrahim Abdel Jardani, "Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes," *J. Geophys. Res.*, vol. 111, B0920, 2006, doi: 10.1029/2005JB004231.
- [18] S. B.-C. N. Grobbe, "Self-Potential Studies in Volcanic Environments: A Cheap and Efficient Method for Multiscale Fluid-Flow Investigations," *Artic. Res.*, vol. 2019, Arti, 2019, doi: 10.1155/2019/2985824.
- [19] D. P. Wulandari, "Identifikasi Pola Aliran Air Tanah di Lapangan Panas Bumi Non- Vulkanik Desa Nyelanding Kabupaten Bangka Selatan Berdasarkan Anomali Self-Potential," *J. Ris. Fis. Indones.*, vol. 2, no. 2, pp. 26–30, 2022, doi: 10.33019/jrfi.v3i2.4311.
- [20] A. Priestley, B. Kulesa, R. Essery, Y. Lejeune, E. Le Gac, and J. Blackford, "Towards the development of an automated electrical self-potential sensor of melt and rainwater flow in snow," *J. Glaciol.*, vol. 68, no. 270, pp. 720–732, 2022, doi: 10.1017/jog.2021.128.
- [21] J. X. Jianxin Liu, Guo, Youjon, "Inversion of self-potential source based on particle swarm optimization," *Res. Net*, no. 4 November, pp. 1–15, 2022, doi:

- 10.1111/1365-2478.13299.
- [22] R. M. Antosia, "Voltmeter Design Based on ADS1115 and Arduino Uno for DC Resistivity Measurement," *Res. Net*, vol. 5, No. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.31544/jtera.v5.i1.2019.73-80.
- [23] F. Neny Fidayanti, I Putu Putrawiyanta, Noveriady, Novalisae, "Pelatihan Penggunaan GPS Untuk Pemetaan Wilayah di Desa Kuluk," *J. Pengabd. Masy.*, vol. 3 No. 4 De, pp. 2109–2116, 2023, doi: 10.33379/icom.v3i4.3560.
- [24] N. F. Toni Tanamal, Yulio Adhiatma, Muhammad Alghifar, Ali Amran Nadeak, "Implementation Fleet Management System With Real Time Monitoring And Controlling," *J. Sos. dan Teknol.*, vol. 8, Agustus, no. 2774–5155, pp. 1–5, 2023, [Online]. Available: <https://sostech.greenvest.co.id/index.php/sostech/article/view/897/1153>
- [25] E. Rosiana, H. Kusnadi, and T. Raharjo, "Sistem Monitoring Panel Surya Berbasis Web," vol. 12, no. 3, pp. 543–548, 2024, doi: 10.26418/justin.v12i3.79793.
- [26] A. Revil and A. Jardani, "The self-potential method: Theory and applications in environmental geosciences," 2010. doi: 10.1017/CBO9781139094252.
- [27] L. D. Thanh, N. C. Thai, N. M. Hung, N. C. Thang, L. Thi, and T. Huong, "Self-Potential Method For Detection Of Water Leakage Through Dams," vol. 4, no. 2, pp. 152–155, 2020, doi: 10.26480/esmy.02.2020.
- [28] E. U. Felix, A. Funmilayo, U. M. David, and A. I. Okon, "Self-potential Anomalies Associated with Subsurface Electrokinetic and Electric Current Density Coupling in Parts of Southern Nigeria," *J. Earth Sci. Geotech. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 1–15, 2024, doi: 10.47260/jesge/1421.
- [29] M. M. Nordiana, A. T. Olugbenga, M. A. Saharudin, S. Nabila, and N. El Hidayah Ismail, "The Application of 2-D Resistivity and Self Potential (SP) Methods in Determining the Water Flow," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 995, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/995/1/012077.
- [30] A. Sumaedi and A. Hadriani, *Teknologi otomatisasi sistem kontrol base on mikrokontroler*. Padang: Gemilang Press Indonesia, 2024. [Online]. Available: [File:///C:/Users/Asus/Downloads/Ebook_Teknologi otomasisistemkontr olbaseonmikrokontroler1](File:///C:/Users/Asus/Downloads/Ebook_Teknologi%20otomatisasi%20sistem%20kontrol%20base%20on%20mikrokontroler1).
- [31] I. Torshin, "Embedded Systems : Architecture , Programming , and Design " by Raj Kamal Liam David Department of Engineering , University of Harvard," vol. No: 02 Iss, no. 13 November, 2023, doi: 10.13140/RG.2.2.20009.36961.
- [32] M. Babiuch, "Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing," no. 09

May 2019, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.

- [33] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things,” *2017 Internet Technol. Appl. ITA 2017 - Proc. 7th Int. Conf.*, no. September, pp. 143–148, 2017, doi: 10.1109/ITECHA.2017.8101926.
- [34] D. Watson, “ESP32 Pinout, Datasheet, Features & Applications,” 2020, [Online]. Available: <https://www.theengineeringprojects.com/2020/12/esp32-pinout-datasheet-features-applications>.
- [35] S. Nair, S. Vataliya, D. Desai, and P. D. Lele, “Designing of Digital Processing System Using ADS1115 and Arduinouno,” *Res. Net*, no. 28 December, pp. 1–11, 2023, [Online]. Available: <file:///C:/Users/Asus/Downloads/Designing-Of-Digital-Processing-System-Using-Ads1115-And-Arduinouno>.
- [36] M. S. Hidayat, “Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro,” *Elektriase J. Sains dan Teknol. Elektro*, vol. 12, no. Sistem Monitoring Air Compressor pada Sistem Pendistribusian Udara Berbasis IoT, pp. 1–5, 2022, doi: doi.org/10.47709.
- [37] A. Rahman, A. Nurfalaq, and R. H. Manrulu, “Rancang Bangun Alat Ukur Resistivitymeter Berbasis Arduino,” vol. 6, no. 1, Maret 2025, pp. 1–8, 2025, [Online]. Available: <https://science.e-journal.my.id/apcp/article/view/257/213>
- [38] J. Jufra, L. Pimpi, A. A. Jufra, A. Alfian, S. Arifin, and N. P. Murnaka, “Penerapan Trilaterasi dan Underdetermined Linear System dalam Penentuan Posisi Objek di Bumi Melalui Global Positioning System (GPS),” *Teorema Teor. dan Ris. Mat.*, vol. 9, no. 2, p. 291, 2024, doi: 10.25157/teorema.v9i2.14112.
- [39] P. Elga, Aris, “Integrasi Modul GPS dengan Arduino - Panduan Langkah demi Langkah.” [Online]. Available: <https://www.arduinoindonesia.id/2024/02/integrasi-modul-gps-dengan-arduino-panduan-langkah-demi-langkah.html>
- [40] O. M. S. M. B. Satheesh, B. Senthilkumar, T. Veeramanikandasamy, “Microcontroller and SD Card Based Standalone Data Logging System using SPI and I2C Protocols for Industrial Application,” *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 2208–2214, 2016, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0504002.
- [41] X. Fang and B. Lu, “Design of Data Acquisition Terminal Based on the FAT32 File System,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2477, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2477/1/012065.

- [42] Ilham, "Menyimpan Data ke SD Card menggunakan Modul Sd card dengan ESP32," *JasaArduino.com*. [Online]. Available: <https://jasaarduino.com/menyimpan-data-ke-sd-card-menggunakan-modul-sd-card-dengan-esp32/>
- [43] P. Livinti and G. Culea, "applied sciences Comparative Study of a Buck DC-DC Converter Controlled by the MPPT (P & O) Algorithm without or with Fuzzy Logic Controller," vol. 14(17), 2024, doi: [org/10.3390/app14177628](https://doi.org/10.3390/app14177628).
- [44] G. E. Moses and D. Ebregebe, "Design and Implementation of a Real-Time Temperature Monitoring System Using Arduino Microcontroller," vol. 11, no. 7, pp. 264–285, 2025, doi: [10.56201/ijemt.vol.11.no7.2025.pg264.285](https://doi.org/10.56201/ijemt.vol.11.no7.2025.pg264.285).
- [45] O. Access, "Design and Implementation of Arduino Microcontroller Based Automatic Lighting Control LCD C2I with Display," vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2018.
- [46] Michael Ibukun Kolawole and Busayo Leah Ayodele, "Smart electronics in solar-powered grid systems for enhanced renewable energy efficiency and reliability," *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 13, no. 2, pp. 2910–2930, 2024, doi: [10.30574/ijsra.2024.13.2.2512](https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.13.2.2512).
- [47] R. A. Hutabarat, "Purwarupa Smart Auto Change Monitoring Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Arduino," vol. 04, no. 01, pp. 34–40, 2023, doi: [10.51510/sinergipolmed.v4i1.1004](https://doi.org/10.51510/sinergipolmed.v4i1.1004).
- [48] A. Bintoro, "Analisa Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan Panel Surya Jenis Mono Chrystalline Kapasitas Daya," vol. 11, pp. 22–25, 2022.
- [49] T. Majaw, R. Deka, S. Roy, and B. Goswami, "Solar Charge Controllers using MPPT and PWM: A Review," *ADB U J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–4, 2018, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/287658-solar-charge-controllers-using-mppt-and-66d6c4aa>.
- [50] R. T. Rw and S. Agung, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Daya 50 Watt Menggunakan Compact Disc Bekas," 2025.
- [51] A. Jaenul, M. Manfaluthy, Y. Pramodja, and F. Anjara, "Pembuatan Sumber Listrik Cadangan Menggunakan Panel Surya Berbasis Internte of Things (IoT) dengan Beban Lampu dan Peralatan Listrik Making a Backup Power Source Using Solar Panels Internet of Things (IoT) Based with Light Loads and Electrical Appliances," vol. 1, no. 3, pp. 143–156, 2022.
- [52] M. R. Putri, F. X. A. Setyawan, and S. Sumadi, "Sistem Kontrol Beban Dan Monitoring Daya Baterai Pada Panel Surya 50Wp Untuk Aplikasi Penerangan Berbasis Internet of Things," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*,

vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.23960/jitet.v10i3.2640.

- [53] N. S. U. Khansa Salsabila Suhaimi , Ali Muhtar, Yusuf Kurniawan, Dean Corio, “Kalibrasi Sensor Tegangan Berbasis Least Square Untuk Meteran Energi Rumah Tangga,” *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 13, no. p-ISSN : 2303 – 2901; e-ISSN : 2654 – 7384, 2025, doi: 10.34010/telekontran.v13i2.17889.
- [54] T. S. Hollanda Arief Kusuma, M. Aris Akbar, “Kalibrasi Sensor Tekanan MS5803-14BA,” vol. 33, no. 2, pp. 108–116, doi: 10.17977/um034v33i2p19-27.
- [55] H. K. Muhammad Nurjati Hidayat, Hemanta Hazarika, “Calibration and Performance Evaluation of Cost-Effective Capacitive Moisture Sensor in Slope Model Experiments,” *Mdpi*, pp. 1–16, 2024, doi: 10.3390/s24248156.
- [56] A. Syakur, “Kalibrasi Sensor Tegangan dan Sensor Arus dengan Menerapkan Rumus Regresi Linear menggunakan Software Bascom AVR,” vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.31331/jsitee.v1i1.1718.
- [57] G. F. Mochamad Rico Dwi Prihantoro, “Perancangan Sistem Keamanan Rumah Dengan Fingerprint Yang Dilengkapi Dengan Kapasitas Baterai 6,8 Mah,” vol. 14, no. 1, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8596.
- [58] F. Jusmi and R. H. Manrulu, “Pemanfaatan Self Potential untuk Pemetaan Kesuburan Tanah,” vol. Vol. 6 No., 2005.
- [59] L. V. Eppelbaum, “Review of Processing and Interpretation of Self-Potential Anomalies: Transfer of Methodologies Developed in Magnetic Prospecting,” *Geosciences*, 2021, doi: 10.3390/geosciences11050194.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Kalibrasi Modul ADC ADS1115

Self Potensial 1

Multimeter (mV)	SP1 (mV)	Error	Error %	Akurasi %	SE	MSE	RMSE
0	0,0387	0,0387	0	100	0,0014	0.0033	0.0577
1	1,05104	0,05104	5,104	94,8960	0,0026		
2,1	2,16974	0,06974	3,3209	96,6790	0,0048		
3	3,02606	0,02606	0,8686	99,1313	0,0006		
4,1	4,1644	0,0644	1,5707	98,4292	0,0041		
5,1	5,14938	0,04938	0,9682	99,0317	0,0024		
6,1	6,13748	0,03748	0,6144	99,3855	0,0014		
7	7,0258	0,0258	0,3685	99,6314	0,0006		
8	8,02692	0,02692	0,3365	99,6635	0,0007		
9,1	9,15062	0,05062	0,5562	99,4437	0,0025		
10	10,02918	0,02918	0,2918	99,7082	0,0008		
11,1	11,1652	0,0652	0,5873	99,4126	0,0042		
12,1	12,14442	0,04442	0,3671	99,6328	0,0019		
13	13,1093	0,10934	0,8410	99,1589	0,0119		
14,1	14,157	0,057	0,4042	99,5957	0,0032		
15,1	15,19886	0,09886	0,6547	99,3452	0,0097		
16,1	16,14052	0,04052	0,2516	99,4832	0,0016		
17,1	17,11574	0,01574	0,0920	99,9079	0,0002		
18,1	18,11756	0,01756	0,0970	99,9029	0,0003		
19	19,08496	0,08496	0,4471	99,5528	0,0072		
20	20,08304	0,08304	0,4152	99,5848	0,0068		

Self Potensial 2

Multimeter (mV)	SP2 (mV)	Error	Error %	Akurasi %	SE	MSE	RMSE
0	0,03486	0,0348	0	100	0,0012	0,0031	0,0554
1	1,0469	0,0469	4,69	95,310	0,0021		
2,1	2,16296	0,0629	2,9980	97,0019	0,0039		
3	3,02548	0,0254	0,8493	99,1506	0,0006		
4,1	4,16304	0,0630	1,5375	98,4624	0,0039		
5,1	5,14646	0,0464	0,9109	99,0890	0,0021		
6,1	6,13794	0,0379	0,6219	99,3780	0,0014		
7	7,0234	0,0234	0,3342	99,6657	0,0005		
8	8,02592	0,0259	0,324	99,676	0,0006		
9,1	9,14856	0,0485	0,5336	99,4663	0,0023		
10	10,02586	0,0258	0,2586	99,7414	0,0006		
11,1	11,16346	0,0634	0,5717	99,4282	0,0040		
12,1	12,14222	0,0422	0,3489	99,6510	0,0017		
13	13,10908	0,1090	0,8390	99,1609	0,0118		
14,1	14,1525	0,0525	0,3723	99,6276	0,0027		
15,1	15,19352	0,0935	0,6193	99,3806	0,0087		
16,1	16,13492	0,0349	0,2168	99,7831	0,0012		
17,1	17,11262	0,0126	0,0738	99,9261	0,0001		
18,1	18,11536	0,0153	0,0848	99,9151	0,0002		
19	19,08066	0,0806	0,4245	99,5754	0,0065		
20	20,08494	0,0849	0,4247	99,5753	0,0072		

Self Potensial 3

Multimeter (mV)	SP3 (mV)	Error	Error %	Akurasi %	SE	MSE	RMSE
0	0,03566	0,0356	0	100	0,0012	0,0025	0,0500
1	1,0473	0,0473	4,73	95,27	0,0022		
2,1	2,16466	0,0646	3,0790	96,9209	0,0041		
3	3,01934	0,0193	0,6446	99,3553	0,0003		
4,1	4,15908	0,0590	1,4409	98,5590	0,0034		
5,1	5,14182	0,0418	0,82	99,18	0,0017		
6,1	6,1299	0,0299	0,4901	99,5098	0,0008		
7	7,01718	0,0171	0,2454	99,7545	0,0002		
8	8,01876	0,0187	0,2345	99,7655	0,0003		
9,1	9,14154	0,0415	0,4564	99,5435	0,0017		
10	10,0201	0,0201	0,201	99,799	0,0004		
11,1	11,15724	0,0572	0,5156	99,4843	0,0032		
12,1	12,13394	0,0339	0,2804	99,7195	0,0011		
13	13,09614	0,0961	0,7395	99,2604	0,0092		
14,1	14,14844	0,0484	0,3435	99,6564	0,0023		
15,1	15,19064	0,0906	0,6002	99,3997	0,0082		
16,1	16,13092	0,0309	0,1920	99,8079	0,0009		
17,1	17,10812	0,0081	0,0474	99,9525	6,5934		
18,1	18,10716	0,0071	0,0395	99,9604	5,1265		
19	19,07044	0,0704	0,3707	99,6292	0,0049		
20	20,07278	0,0727	0,3639	99,6361	0,0052		

Self Potensial 4

Multimeter (mV)	SP4 (mV)	Error	Error %	Akurasi %	SE	MSE	RMSE
0	0,0364	0,0364	0	100	0,0013	0,0027	0,0516
1	1,048	0,048	4,8	95,2	0,0023		
2,1	2,16516	0,0651	3,1028	96,8971	0,0042		
3	3,02104	0,0210	0,7013	99,2986	0,0004		
4,1	4,16016	0,0601	1,4673	98,5326	0,00361		
5,1	5,14398	0,0439	0,8623	99,1376	0,0019		
6,1	6,13312	0,0331	0,5429	99,4570	0,0010		
7	7,01974	0,0197	0,282	99,718	0,0003		
8	8,02164	0,0216	0,2705	99,7295	0,0004		
9,1	9,1442	0,0442	0,4857	99,5142	0,0019		
10	10,0245	0,0245	0,245	99,755	0,0006		
11,1	11,15974	0,0597	0,5381	99,4618	0,0035		
12,1	12,13704	0,0370	0,3061	99,6938	0,0013		
13	13,09912	0,0991	0,7624	99,2375	0,0098		
14,1	14,14828	0,0482	0,3424	99,6575	0,0023		
15,1	15,1902	0,0902	0,5973	99,4026	0,0081		
16,1	16,13098	0,0309	0,1924	99,8075	0,0009		
17,1	17,11006	0,0100	0,0588	99,9411	0,0001		
18,1	18,1075	0,0075	0,0414	99,9585	5,625		
19	19,07156	0,0715	0,3766	99,6233	0,0051		
20	20,07738	0,0773	0,3869	99,6131	0,0059		

Lampiran 2. Hasil Perhitungan Kalibrasi Modul ADC ADS1115 Error, Akurasi, dan RMSE

- **Perhitungan Persentase Error SP1**

$$error = \frac{Nilai Kalibrasi - Nilai Sebenarnya}{Nilai Sebenarnya} \times 100\%$$

$$error = \frac{1.0510 - 1}{1} \times 100\% = 5,104\%$$

$$Rata - rata Error (\%) = \frac{0\% + 5,104\% + 3,3209\% + \dots n}{21} \times 100\% = 0,8646\%$$

- **Perhitungan Persentase Error SP2**

$$error = \frac{1.0469 - 1}{1} \times 100\% = 4,69\%$$

$$Rata - rata Error (\%) = \frac{0\% + 4,69\% + 2,9980\% + \dots n}{21} \times 100\% = 0,8111\%$$

- **Perhitungan Persentase Error SP3**

$$error = \frac{1.0473 - 1}{1} \times 100\% = 4,73\%$$

$$Rata - rata Error (\%) = \frac{0\% + 4,73\% + 3,0790\% + \dots n}{21} \times 100\% = 0,7540\%$$

- **Perhitungan Persentase Error SP4**

$$error = \frac{1.048 - 1}{1} \times 100\% = 4,8\%$$

$$Rata - rata Error (\%) = \frac{0\% + 4,8\% + 3,1028\% + \dots n}{21} \times 100\% = 0,7791\%$$

- **Akurasi SP1**

$$Akurasi = 100\% - error(\%)$$

$$Rata - rata Akurasi(\%) = 100\% - 5,104\% = 99,1353\%$$

- **Akurasi SP2**

$$Rata - rata Akurasi(\%) = 100\% - 4,69\% = 99,1888\%$$

- **Akurasi SP3**

$$Rata - rata Akurasi(\%) = 100\% - 4,73\% = 99,2459\%$$

- **Akurasi SP4**

$$Akurasi = 100\% - error(\%) = 100\% - 4,8 = 99,2208\%$$

- **RMSE (Root Mean Square Error) SP1**

Squared Error (SE) merupakan nilai kuadrat dari selisih antara hasil pengukuran sensor dan nilai acuan. *Mean Squared Error* (MSE) diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata dari seluruh nilai SE. *Root Mean Squared Error* (RMSE) merupakan akar kuadrat dari MSE yang digunakan untuk menggambarkan besarnya kesalahan rata-rata pengukuran.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_b - x_a)^2}{n}}$$

$$MSE = \frac{0,0026 + 0,0048 + 0,0006 + 0,0041 + 0,0024}{21} = 0,0033$$

$$SE = (1,0510 - 1)^2 = 0,0026$$

$$RMSE = \sqrt{0,0033} = 0,0577 \text{ mV}$$

- **RMSE (Root Mean Square Error) SP2**

$$MSE = \frac{0,0021 + 0,0039 + 0,0006 + 0,0039 + 0,0021}{21} = 0,0031$$

$$SE = (1,0469 - 1)^2 = 0,0022$$

$$RMSE = \sqrt{0,0030} = 0,0554 \text{ mV}$$

- **RMSE (Root Mean Square Error) SP3**

$$MSE = \frac{0,0022 + 0,0041 + 0,0003 + 0,0034 + 0,0017}{21} = 0,0025$$

$$SE = (1,0473 - 1)^2 = 0,0022$$

$$RMSE = \sqrt{0,0025} = 0,0500 \text{ mV}$$

- **RMSE (Root Mean Square Error) SP4**

$$MSE = \frac{0,0023 + 0,0042 + 0,0004 + 0,0036 + 0,0010}{21} = 0,0027$$

$$SE = (1,048 - 1)^2 = 0,0023$$

$$RMSE = \sqrt{0,0026} = 0,0516 \text{ mV}$$

Lampiran 3. Hasil Perbandingan Data Kalibrasi Modul ADC ADS111

SP1 (mV)	
RMSE	0,0577
AKURASI	99,1353

SP2 (mV)	
RMSE	0,0554
AKURASI	99,1888

SP3 (mV)	
RMSE	0,0500
AKURASI	99,2459

SP4 (mV)	
RMSE	0,0516
AKURASI	99,2208



Lampiran 4. Keseluruhan Kode Program Pengukuran *Self Potential*

Berikut ini keseluruhan kode program yang digunakan pada alat ukur *Self Potential* dalam penelitian ini dapat diakses melalui tautan Google Drive yang disediakan. Untuk mempermudah akses, tautan tersebut juga disajikan dalam bentuk QR Code di bawah ini :

https://drive.google.com/drive/folders/18Yspcfgkitxktx0UsRuGOdNNzKcDm1YR?usp=drive_link



Lampiran 5. Hasil Data Uji Lapang Tanah Baskuit dan Tanah Pesisir

Data lengkap penelitian tersedia melalui link Google Drive dan juga dapat diakses melalui QR Code berikut ini :

https://drive.google.com/drive/folders/1OW3c3VZFhjYl4ql4Ic48zC87MylBz6IE?usp=drive_link

**SCAN KESELURUHAN
DATA PENELITIAN**



Lampiran 6. Dokumentasi Proses Pengambilan Data di Lapangan Pada Tanah Bauksit



Lampiran 7. Dokumentasi Proses Pengambilan Data di Lapangan Pada Tanah Pesisir





RIWATAY HIDUP

M. Rusydi lahir di Pasar Gunung pada tanggal 15 September 2004. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Anto dan Ibu Suyati.

Penulis memulai pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri Padat Karya 058108 pada tahun 2010 dan menyelesaikannya pada tahun 2016. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Secanggang dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2019. Selanjutnya, pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan di SMK Swasta Putra Jaya Stabat dan lulus pada tahun 2022.

Pada tahun 2022 penulis diterima sebagai mahasiswa Universitas Maritim Raja Ali Haji melalui jalur SNMPTN pada Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Program Studi Teknik Elektro. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HMTE).

Pada tahun 2025, penulis berpartisipasi dalam kegiatan Pelatihan Teknologi Antena: ✨ Menumbuhkan Semangat Kritis dan Inovatif Siswa ✨ SMKN 1 Tanjungpinang. Dalam kegiatan tersebut, penulis berperan sebagai desainer antena, pemateri, serta mengimplementasikan prototipe antena mikrostrip dan antena Yagi sebagai media pembelajaran bagi peserta pelatihan.

Selanjutnya, pada bulan April hingga Mei 2026, penulis mengikuti program sebagai Quantity Take-Off Engineer pada Proyek Pengembangan Changi Airport, Singapura, yang memberikan pengalaman dalam bidang estimasi kuantitas pekerjaan serta pengelolaan proyek konstruksi berskala internasional.

Penulis menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji pada tahun 2026 dengan melakukan penelitian yang berjudul **"Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Ukur Self Potential Berbasis ADC ADS1115."**