

RANCANG BANGUN *CYCLIC VOLTAMMETRY* BERBASIS ARDUINO UNO R3 UNTUK PENGUKURAN ELEKTROKIMIA SEDERHANA MENGGUNAKAN $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ DAN PBS

Ridho Rijaldi, Lazuardi Umar*

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru,
Pekanbaru, 28293, Indonesia

*email: lazuardi@lecturer.unri.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan akan pengukuran elektrokimia di laboratorium cukup tinggi, namun keterbatasan akses terhadap potensiostat komersial sering menjadi kendala karena harganya yang relatif mahal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang instrumen portabel guna memungkinkan pengukuran elektrokimia sederhana tanpa harus menggunakan alat komersial. Alat ini dirancang untuk melakukan pengujian elektrokimia modern, yang bekerja dengan menganalisis karakteristik larutan melalui respons arus terhadap penerapan potensial listrik. Dalam pengembangannya, digunakan mikrokontroler Arduino UNO berbasis chip ATmega328p. Rangkaian ini dilengkapi dengan op-amp TL074 untuk pengaturan sinyal tegangan, serta modul DAC dan ADC eksternal karena Arduino UNO tidak memiliki fitur tersebut secara internal. Pengambilan data dilakukan secara real-time menggunakan perangkat lunak Polarographica dengan metode voltametri siklik. Alat ini mampu menghasilkan grafik voltametri siklik dan puncak redoks yang jelas, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi pengukuran elektrokimia dasar seperti voltametri siklik pada sampel $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ (potasium ferrosianida) dan phosphate buffered saline (PBS).

Kata Kunci: Rancang bangun; Voltametri siklik; Elektrokimia; Arduino UNO; Portabel

ABSTRACT

[Title: Design Of Cyclic Voltammetry Based On Arduino Uno R3 For Simple Electrochemical Measurements Using $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ And PBS] The need for electrochemical measurement in laboratories is significant, yet access to commercial potentiostats is often limited due to their high cost. This research aims to develop an instrument that enables simple electrochemical measurements without relying on commercial instruments. The designed device facilitates modern electrochemical testing by analyzing solution characteristics through current responses generated by applied electrical potential. This device was built using an Arduino UNO microcontroller board based on the ATmega328p chip. The circuit incorporates a TL074 operational amplifier for voltage signal regulation and utilizes external DAC and ADC modules, as the Arduino UNO lacks built-in DAC and ADC capabilities. Data acquisition is performed in real time with Polarographica software using cyclic voltammetry. This instrument successfully produced cyclic voltammetry graphs and clear redox peaks, making it suitable for basic electrochemical applications such as cyclic voltammetry using $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ (potassium ferrocyanide) and phosphate buffered saline (PBS).

Keywords: Design; Cyclic voltammetry; Electrochemical; Arduino UNO; Portable

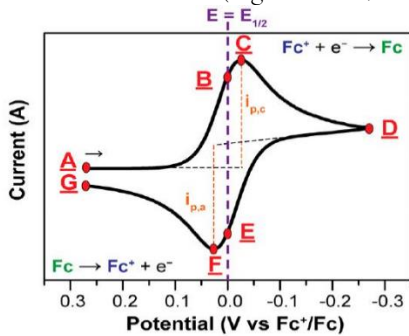
PENDAHULUAN

Baterai merupakan salah satu penemuan di abad ini untuk bidang fisika energi. Karakteristik baterai menentukan kemampuan dalam menyimpan dan mengeluarkan energi. Salah satu alat karakteristik baterai adalah potensiostat yang berfungsi mengontrol potensial dan mengukur arus selama reaksi elektrokimia. Alat ini banyak digunakan untuk menganalisis reaksi redoks dan karakteristik material melalui berbagai teknik elektroanalisis seperti *Cyclic Voltammetry* (CV). Respons proses elektroda yang berlangsung pada sel

elektrokimia dipengaruhi oleh interaksi antara kinetika reaksi transfer muatan, modalitas transpor massa yang beroperasi, dan ada atau tidaknya proses non-elektrokimia tambahan. Metode CV merupakan salah satu teknik elektrokimia yang paling populer karena kemudahan penggunaannya dan sensitivitas responsnya yang tinggi terhadap kondisi eksperimen (Martínez-garcía et al., 2025).

Sinyal input berbentuk gelombang potensial segitiga (*triangular waveform*), dengan laju perubahan potensial disebut *scan rate* dan dinyatakan dalam V/s atau mV/s. Data hasil pengukuran disajikan dalam

bentuk CV, yaitu grafik arus (sumbu Y) terhadap potensial (sumbu X) seperti pada Gambar 1. Bentuk voltammogram memberikan informasi penting mengenai potensial redoks, kinetika transfer elektron, mekanisme reaksi, serta konsentrasi analit dalam sistem elektrokimia (Elgrishi *et al.*, 2018).

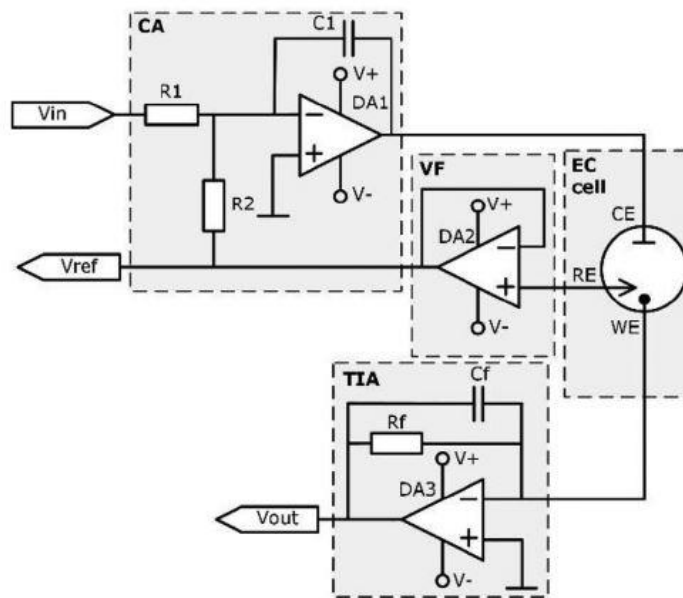


Gambar 1. Voltametri Siklik (Elgrishi, *et al.*, 2018).

Potensiostat adalah alat yang digunakan untuk mengontrol potensial pada elektroda dalam suatu sel elektrokimia dengan cara menstabilkan potensial elektroda pada nilai tertentu dan mengukur arus

yang mengalir di dalam sel pada potensial tersebut. (Arema *et al.*, 2015). Potensiostat yang umumnya digunakan memiliki tiga elektroda. Prinsip kerja potensiostat adalah mempertahankan tegangan antara *working electrode* (WE) dan *reference electrode* (RE) pada nilai tertentu dengan mengatur arus yang mengalir dari *counter electrode* (CE). Jika tegangan sel elektrokimia dapat dipertahankan pada nilai konstan, aliran arus antara WE dan CE dapat diproses untuk menganalisis karakteristik sampel (Muid *et al.*, 2014).

Potensiostat didasarkan pada satu op-amp yang disebut *control amplifier* (CA). Prinsip utama potensiostat seperti pada Gambar 2 memerlukan unit elektronik penting dimana polarisasi salah satu elektroda dilakukan oleh CA. Potensi kesetimbangan *reference electrode* (RE) diukur oleh *voltage follower* (VF), sedangkan pengukuran arus yang diperlukan dilakukan oleh *transimpedance amplifier* (TIA) (Dryden & Wheeler, 2015).



Gambar 2. Potensiostat sederhana (Snizhko *et al.*, 2023)

Muatan diangkut melalui elektroda karena adanya perpindahan elektron. Elektroda berperan sebagai anoda yang berfungsi sebagai tempat terjadinya oksidasi dan katoda yang berfungsi sebagai tempat terjadinya reduksi. Laju keseluruhan perubahan reaktan menjadi produk pada elektroda diukur dengan arus I yang melewati permukaan logam atau larutan. Arus biasanya dinormalisasi dengan luas permukaan elektroda A dan dinyatakan sebagai rapat arus j untuk menghindari kemungkinan perbedaan akibat ukuran permukaan, sehingga laju

reaksi v dapat dinyatakan pada persamaan 1 sebagai berikut:

$$v = \frac{I}{nFA} = \frac{j}{nF} \tag{1}$$

dimana n adalah jumlah elektron yang ditukar reaksi elektrokimia dan F adalah konstanta Faraday (96485 C mol⁻¹). Arus keseluruhan yang melewati sel elektrokimia bisa ditingkatkan dengan memperluas area permukaan atau meningkatkan kecepatan reaksi (Bard & Faulkner, 2001). Pada pengukuran voltametri siklik, hubungan antara arus puncak yang dihasilkan dan laju pindai potensial dijelaskan oleh

persamaan Randles–Ševčík. Persamaan ini digunakan untuk sistem reaksi redoks yang bersifat reversibel dan dikontrol oleh difusi pada suhu 25 °C, dengan bentuk matematis pada persamaan 2 sebagai berikut:

$$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A D^{1/2} C v^{1/2} \frac{i}{nFA} = \frac{j}{nF} \quad (2)$$

Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa arus puncak berbanding lurus dengan akar kuadrat laju pindai, sehingga dengan memvariasikan kecepatan pindai dapat diperoleh informasi mengenai mekanisme transport massa serta sifat reversibilitas reaksi redoks pada permukaan elektroda. Persamaan Randles–Ševčík menjadi dasar penting dalam analisis data voltametri siklik, karena memungkinkan perhitungan parameter difusi dan karakteristik kinetika sistem elektrokimia yang diuji dimana i_p adalah arus puncak, n adalah jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi, A adalah luas permukaan elektroda, D merupakan koefisien difusi spesies elektrokimia, C adalah konsentrasi analit dalam larutan, dan v adalah laju pindai potensial (Bard & Faulkner, 2001).

Seiring perkembangan teknologi, potensiostat kini dapat dibuat dalam bentuk portabel, namun versi komersialnya masih memiliki harga yang relatif tinggi. Hal ini mendorong munculnya berbagai penelitian untuk mengembangkan potensiostat berbiaya rendah menggunakan microcontroller (MCU). MCU berperan sebagai pusat kendali sistem yang mengatur konversi sinyal analog dan digital melalui protokol komunikasi seperti SPI (Serial Peripheral Interface) atau I2C (Inter-Integrated Circuit). Salah satu platform MCU yang populer adalah Arduino UNO berbasis ATmega328P, karena mudah diprogram, murah, dan didukung komunitas yang luas (Meloni, 2016).

Arduino UNO memiliki keterbatasan pada resolusi Analog-to-Digital Converter (ADC) dan Digital-to-Analog Converter (DAC) internal, namun Arduino dapat dikombinasikan dengan komponen eksternal untuk meningkatkan performa. Inovasi ini memungkinkan pembuatan potensiostat sederhana dengan biaya yang jauh lebih rendah tanpa mengurangi fungsi utama alat (Cordova-Huaman *et al.*, 2021).

Muid *et al.* (2014) menggunakan MCU ATXMega32 dengan DAC dan ADC internal, namun sinyal CV yang dihasilkan belum halus karena gangguan noise digital. Sementara itu, Caux *et al.* (2022) mengembangkan PassStat dengan berbagai versi, tetapi penggunaan op-amp LMC6484 menyebabkan noise tinggi. Crespo *et al.* (2021) juga menggunakan Arduino UNO dan op-amp OP07,

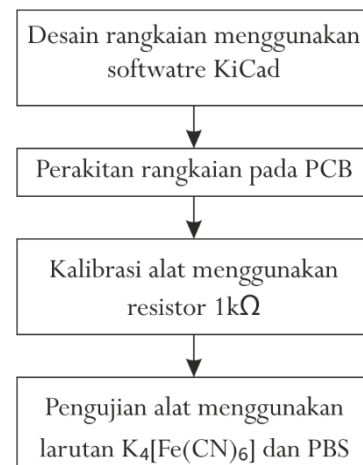
namun hasil pengukuran kurang stabil dan desain PCB (printed circuit board) cukup kompleks.

Penelitian perancangan potensiostat lainnya pernah dilakukan oleh Ibrahim *et al.* (2023) yaitu mengembangkan potensiostat bernama We-VoltamoStat yang memiliki fitur pemantauan sinyal dan pengumpulan data secara nirkabel melalui smartphone. Pengujian kinerja perangkat secanggih We-VoltamoStat dengan menggunakan sampel Palmsens dummy cell menunjukkan akurasi yang baik tetapi biaya produksinya masih terbilang mahal karena perangkat tersebut memiliki beberapa bagian rangkaian seperti Battery charger, GPIO expander, Voltammetry amplifier, Main board, dan Link board.

Studi ini mengembangkan instrumen potensiostat berbasis Arduino UNO yang dikombinasikan dengan ADC eksternal ADS1115 dan DAC eksternal MCP4725. Rangkaian ini menggunakan op-amp TL074 yang memiliki low noise dan high slew rate untuk meningkatkan kestabilan sinyal. Pengujian dilakukan menggunakan metode Cyclic Voltammetry (CV) pada larutan $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ dan PBS dengan variasi kecepatan 20–100 mV/s. Penelitian ini menghasilkan instrumen portabel yang fungsional, ekonomis serta mudah direplikasi sehingga dapat menjadi sarana edukatif dan penelitian dasar di bidang elektrokimia.

METODE

Desain rangkaian menggunakan software KiCad menjadi tahap awal penelitian mengacu pada desain yang sudah dibuat oleh Tichter *et al.* (2021) dan dimodifikasi untuk mengurangi risiko kerusakan dan gangguan noise. Gambar 3 menampilkan diagram alur penelitian ini.

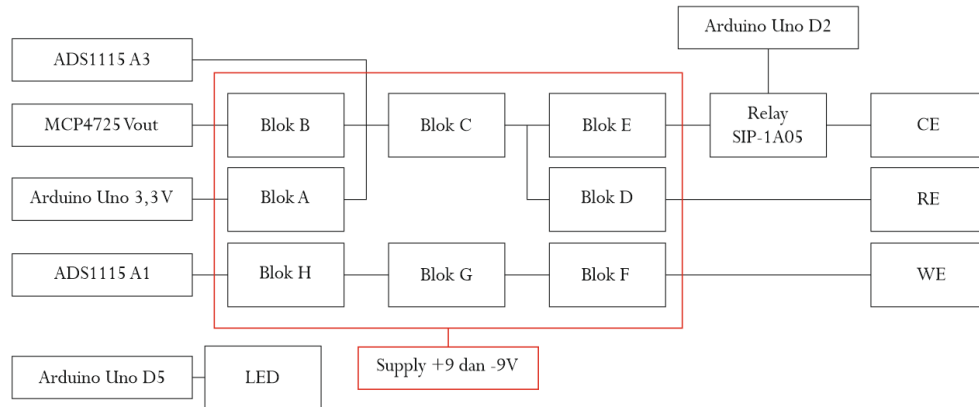


Gambar 3. Diagram alur penelitian

Modifikasi dilakukan melalui penggantian dan penambahan komponen agar sistem lebih stabil dan

efisien. Rangkaian ini menggunakan IC TL074 sebagai op-amp. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tichter *et al.* (2021) menggunakan IC LM324 memiliki arus input bias sekitar 100 nA dan dapat menimbulkan masalah pada rangkaian.

Komponen tersebut diganti dengan IC TL074 yang memiliki arus input bias lebih kecil yaitu 100 pA dan memiliki kaki yang sama dengan IC LM324. Gambar 4 menampilkan blok diagram rangkaian.



blok A = konfigurasi op-amp pembalik
 blok B, D, dan H = konfigurasi op-amp buffer
 blok C, E dan G = konfigurasi op-amp penjumlahan dan pembalik
 blok F = konfigurasi op-amp transimpedance amplifier (TIA)

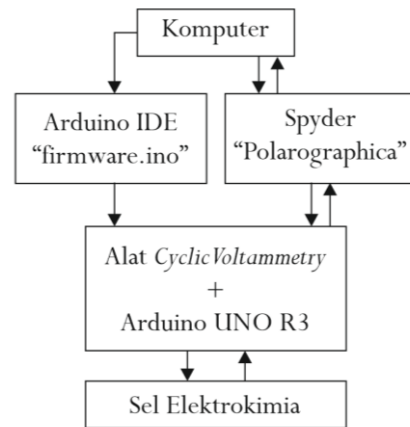
Gambar 4. Blok diagram rangkaian

Rangkaian ini ditambahkan ADC dan DAC eksternal untuk mengatur sinyal input dan sinyal yang diterima karena ADC dan DAC internal dari Arduino UNO R3 masih memiliki kekurangan seperti resolusi hanya 10 bit, DAC internal Arduino UNO menggunakan PWM yang bukan merupakan sinyal DC murni. LED sebagai indikator untuk mengetahui alat sedang berjalan dan Relay SIP-1A05 untuk menghubungkan CE ke Blok E yang bertugas untuk mengalirkan arus ke dalam sel elektrokimia untuk menyeimbangkan reaksi yang terjadi.

Tegangan Supply +9V dan -9V didapatkan dari 2 baterai yang dihubungkan dengan meletakkan kutub positif dan negatif dari masing-masing baterai serta kutub lainnya dihubungkan ke op-amp TL074 sebagai supply tegangan. Rangkaian portabel ini diimplementasikan dan disesuaikan beberapa kali pada papan breadboard sebelum dipindahkan ke papan PCB. Setelah rangkaian dipasang pada papan breadboard dan koneksi dipastikan sudah benar, tahap selanjutnya adalah rangkaian disolder pada PCB, kemudian ditempatkan di atas Arduino UNO dengan menyambungkannya menggunakan pin.

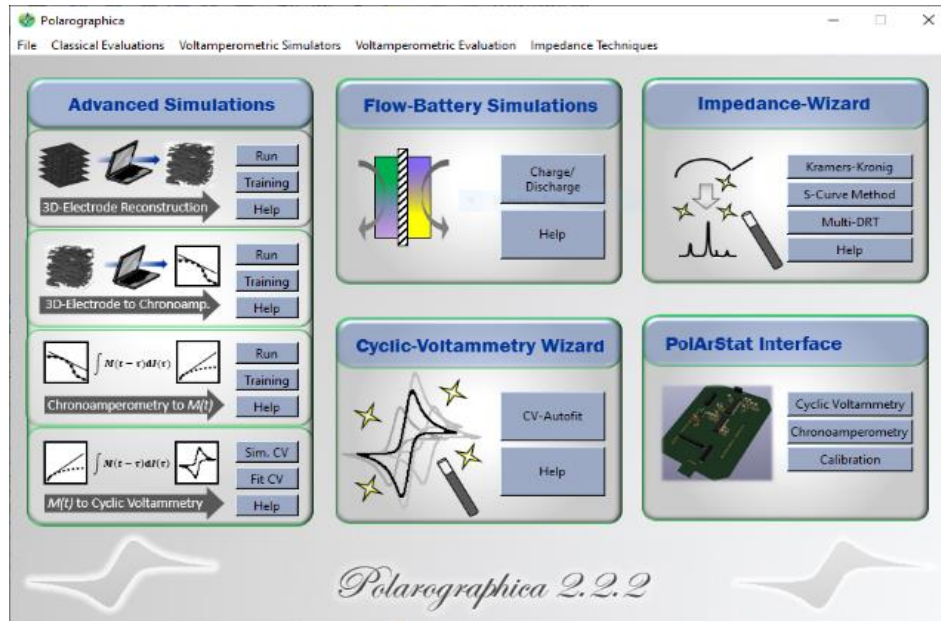
Pengujian alat dilakukan menggunakan *software* Polarographica. *Software* yang digunakan adalah Arduino IDE dan Spyder. Program “firmware.ino” berfungsi sebagai media komunikasi antara *software* dan *hardware*. Gambar 5 menampilkan *flowchart software* pada penelitian ini.

Polarographica dapat diakses melalui Spyder yang menggunakan bahasa pemrograman Python.



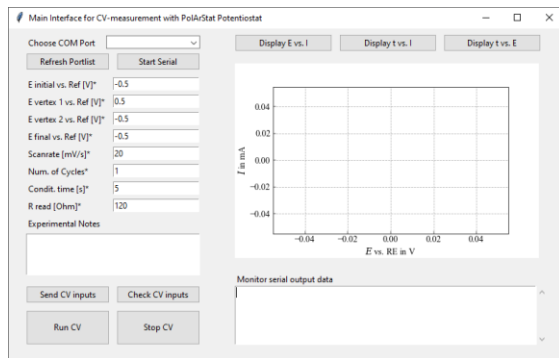
Gambar 5. Flowchart software

Pada penelitian ini digunakan *software* Polarographica yang merupakan *software open-source* yang diciptakan oleh Tichter *et al.* (2021) untuk mensimulasikan dan mengevaluasi eksperimen elektroanalisis. *Software* ini mengontrol rangkaian menggunakan *graphical user interface* (GUI). Gambar 6 menampilkan tampilan Main Window dari Polarographica. Polarographica terdapat beberapa versi, versi yang digunakan pada penelitian ini yaitu versi 2.2.4 karena fitur lebih lengkap dan data dapat dilihat secara *real-time* tanpa *scroll* ke bawah untuk melihat data yang saat ini didapatkan.



Gambar 6. Polarographica (Tichter et al.,2021)

Instrumen ini dikalibrasi dengan melakukan eksperimen *linear sweep voltammetry* (LSV) menggunakan resistor presisi 1 kΩ (±1%) sebagai dummy yang mencakup skala penuh potensial yaitu ±3 V. Eksperimen ini dilakukan dengan mengatur perangkat dalam konfigurasi dua elektroda yaitu dalam hubungan RE/CE—WE dimana RE dan CE dihubungkan secara seri ke salah satu kaki resistor dan WE dihubungkan ke kaki resistor lainnya. Hasil eksperimen LSV dari resistor presisi 1 kΩ (±1%) yang diperoleh dibandingkan dengan simulasi resistor Ohmik tepat 1 kΩ. Hasil yang mendekati 1 berada dalam rentang toleransi kesalahan resistor presisi. Uji LSV dengan resistor *dummy* dilakukan dengan memilih button “Cyclic Voltammetry” pada Polarographica. Gambar 7 menunjukkan *interface* dari menu Cyclic Voltammetry.



Gambar 7. Interface menu CV (Tichter et al., 2021).

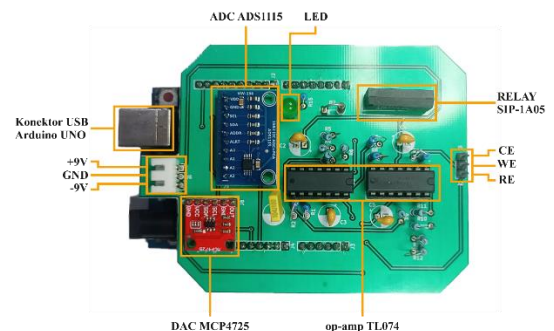
Pengujian perangkat ini dilakukan setelah kalibrasi menggunakan larutan potasium ferisianida (K₄[Fe(CN)₆]) dan *phosphate buffer saline* (PBS. Kedua

larutan ini merupakan sistem redoks standar yang sangat umum digunakan dalam voltametri siklik karena memiliki sifat-sifat ideal seperti perilaku reversibel yang baik. Karakteristik larutan PBS yang digunakan terdiri dari 137 mM NaCl, 2.7 mM KCl, 8 mM Na₂HPO₄ dan 2 mM KH₂PO₄ dengan pH 7,4. Volume larutan yang dimasukkan ke dalam chamber elektroda biochip yaitu sebanyak 150µL menggunakan pipet eppendorf.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perakitan dan Pemrograman Alat

Instrumen berhasil dirakit pada PCB menggunakan komponen utama Arduino UNO, modul DAC MCP4725, modul ADC ADS1115, dan IC op-amp TL074. Implementasi program melalui Arduino IDE mengatur pembangkitan sinyal tegangan dan pembacaan arus, dengan data dikirim secara real-time ke software Polarographica untuk visualisasi grafik CV. Gambar 8 menampilkan perakitan alat pada PCB.



Gambar 8. Voltametri siklik portabel pada PCB

Langkah berikutnya Setelah perangkat keras selesai dirakit adalah implementasi program

menggunakan Arduino IDE. Program ditulis untuk mengontrol output tegangan dari DAC MCP4725 dan membaca nilai arus dari ADC ADS1115. Program juga mengatur waktu sampling dan siklus tegangan dalam bentuk ramp atau gelombang segitiga, sesuai dengan prinsip voltametri siklik. Salah satu bagian penting dalam program adalah pengiriman data hasil pembacaan arus dan tegangan melalui komunikasi serial. Data tersebut kemudian direkam dan divisualisasikan menggunakan software Polarographica, sehingga pengguna dapat melihat grafik voltametri secara real-time.

Implementasi kode program juga mencakup proses kalibrasi awal, pembacaan nilai tegangan, konversi analog-ke-digital (ADC), serta pengiriman data dengan format tertentu agar dapat terbaca oleh software Polarographica. Program akan menghasilkan sinyal tegangan output secara bertahap (linear ramp), kemudian membaca arus pada WE dan mengirimkannya melalui serial port. Hasil pengiriman data ini akan divisualisasikan sebagai grafik arus terhadap tegangan (I vs V), sehingga kurva CV dapat diperoleh. Program Arduino diimplementasikan ke perangkat yang telah dibuat dan dijalankan. Program ini bernama "Firmware.ino" dibuka menggunakan Arduino IDE, kemudian kabel serial Arduino disambungkan ke port USB, dan program dijalankan. Firmware ini menggunakan library eksternal yaitu ADS1X15 dan MCP4725 untuk memudahkan pemrograman modul DAC dan ADC yang digunakan. LED dihubungkan ke Arduino pin 5 digital untuk menjadi penanda bahwa rangkaian tersebut berfungsi dengan baik.

Kalibrasi potensiostat menggunakan resistor dummy

Proses kalibrasi dilakukan sebelum pengukuran larutan elektrolit untuk memastikan bahwa sistem bekerja dengan benar, khususnya dalam membaca hubungan tegangan dan arus secara linier. Kalibrasi ini dilakukan dengan menggunakan resistor dummy sebagai beban pengganti larutan untuk memverifikasi bahwa hukum Ohm berlaku secara linier dalam sistem yang dirancang. Dalam pengujian ini, digunakan resistor sebesar 1kΩ yang dihubungkan dalam konfigurasi WE – R1000 – RE/CE, yaitu dengan menghubungkan elektroda kerja (WE) ke salah satu ujung resistor, dan ujung resistor lainnya dihubungkan ke elektroda pembanding dan pembantu (RE dan CE) yang disatukan. Konfigurasi ini digunakan untuk mensimulasikan sel elektrokimia dengan karakteristik resistif murni, sehingga arus yang dihasilkan seharusnya berbanding lurus terhadap tegangan yang diberikan.

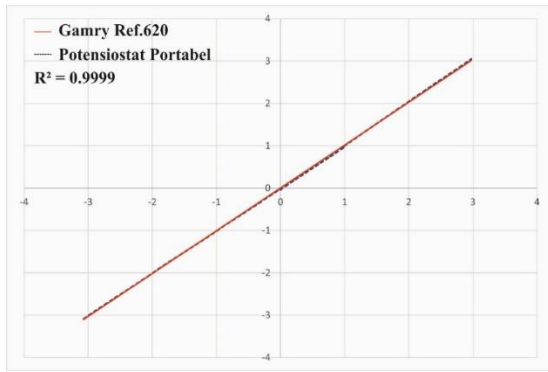
Tegangan output dari DAC diatur dalam bentuk ramp dari -3 V hingga sekitar 3V, kemudian nilai arus yang mengalir diukur menggunakan ADC dan dikonversi menjadi satuan mikroampere. Kalibrasi dijalankan dengan memasukkan nilai pada *form* yang tersedia seperti pada Tabel 1. Uji ini dilakukan sebanyak 6 kali dengan *scanrate* 20 mV/s dalam rentang -3 V hingga +3 V. Proses kalibrasi ini berlangsung selama total 20 menit karena *scanrate* yang dimasukkan 20 mV/s dimana pada *scanrate* tersebut, data yang didapatkan lebih bagus.

Tabel 1. Nilai input pengukuran LSV menggunakan resistor *dummy*

E Initial vs Ref (V)	E Vertex 1 vs Ref (V)	E Vertex 2 vs Ref (V)	E final vs Ref (V)	Scanrate (mV/s)	Num. Of Cycles	Condit. time	R read (Ω)
-3	-2	-2	-2	20	1	5	120
-2	-1	-1	-1	20	1	5	120
-1	0	0	0	20	1	5	120
0	1	1	1	20	1	5	120
1	2	2	2	20	1	5	120
2	3	3	3	20	1	5	120

Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh bahwa grafik antara tegangan terhadap arus membentuk garis lurus, yang menandakan bahwa sistem potensiostat berhasil merepresentasikan hubungan linier antara tegangan dan arus pada beban resistif. Garis *trendline* yang didapatkan dari kalibrasi instrumen ini menunjukkan angka $R^2 = 0.9999$ dan hasilnya mendekati Gamry Ref.620 (Tichter, et al., 2021) Grafik hasil pengukuran menggunakan resistor 1kΩ ditampilkan pada Gambar 9. Pengujian dengan resistor dummy ini

sangat penting dilakukan sebelum mengukur larutan elektrokimia, karena memberikan tolak ukur dasar sistem dalam kondisi ideal. Keberhasilan kalibrasi ini menunjukkan bahwa potensiostat telah siap digunakan untuk pengukuran yang lebih kompleks seperti voltametri siklik menggunakan larutan redoks standar.



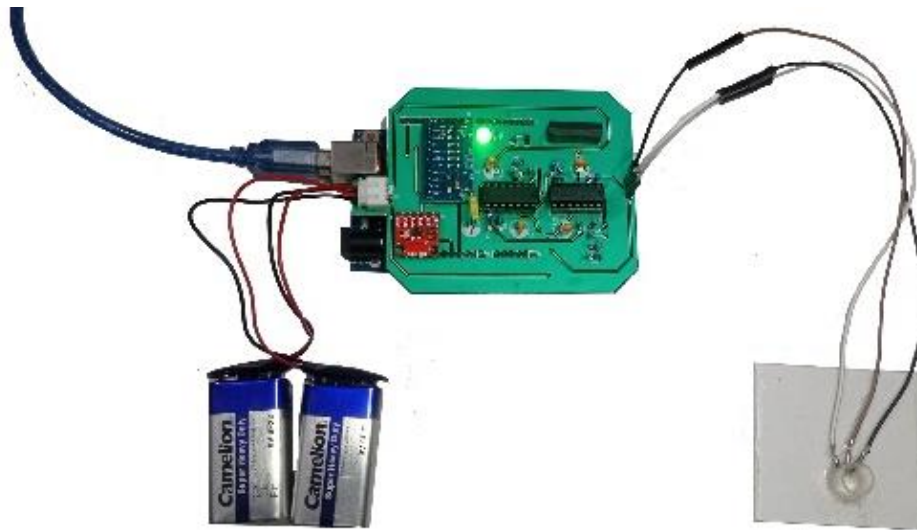
Gambar 9. Kurva linier hasil kalibrasi dengan resistor dummy 1 kΩ.

Dari grafik tersebut, dilakukan regresi linier untuk mengetahui sejauh mana linearitas hubungan arus terhadap tegangan. Diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.9999, yang menunjukkan bahwa 99% variasi arus dapat dijelaskan oleh variasi tegangan input — artinya hubungan tersebut sangat linier. Hal ini juga memperkuat bahwa sistem rangkaian, penguatan sinyal, dan pembacaan ADC bekerja dengan baik dan akurat untuk skenario

resistif sederhana. Pengujian dengan resistor dummy ini sangat penting dilakukan sebelum mengukur larutan elektrokimia, karena memberikan tolak ukur dasar sistem dalam kondisi ideal. Keberhasilan kalibrasi ini menunjukkan bahwa potensiostat telah siap digunakan untuk pengukuran yang lebih kompleks seperti voltametri siklik menggunakan larutan redoks standar.

Pengujian Sampel $K_4[Fe(CN)_6]$ dan PBS

Pengujian alat menggunakan sampel dilakukan dengan konfigurasi 3 elektroda (WE,RE,CE). Sampel diteteskan di dalam elektroda Chamber. Gambar 10 menunjukkan pengujian alat menggunakan sampel. Uji CV ini dilakukan sebanyak 5 kali dengan 5 variasi *scanrate* 20,40,60,80, dan 100 mV/s. Nilai input untuk sampel ini titik awalnya dari 0 V, kemudian menuju 1 V, dan kembali lagi menjadi 0 V sehingga didapatkan data CV yang diinginkan. Tabel 2 menampilkan nilai input pada Polarographica untuk uji sampel $K_4[Fe(CN)_6]$.



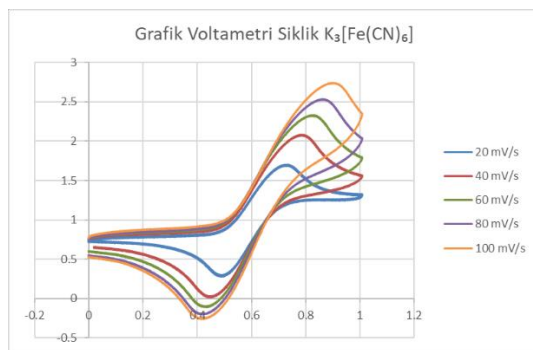
Gambar 10. Pengujian alat menggunakan sampel dengan konfigurasi 3 elektroda

Tabel 2 Nilai input pengukuran CV menggunakan sampel $K_4[Fe(CN)_6]$

E Initial vs Ref (V)	E Vertex 1 vs Ref (V)	E Vertex 2 vs Ref (V)	E final vs Ref (V)	Scanrate (mV/s)	Num. Of Cycles	Condit. time	R read (Ω)
0	1	0	0	20	1	5	120
0	1	0	0	40	1	5	120
0	1	0	0	60	1	5	120
0	1	0	0	80	1	5	120
0	1	0	0	100	1	5	120

E Initial vs Ref adalah input tegangan awal pengujian alat, E Vertex 1 vs Ref dan E Vertex 2 vs Ref adalah input tegangan balik, sedangkan E final vs Ref adalah titik akhir yang biasanya bernilai sama dengan E Initial vs Ref. Scanrate adalah laju pindai yang dapat divariasikan, Num. Of Cycles adalah banyaknya *cycle* yang ingin diuji. Cond. Time merupakan waktu tunggu sebelum melakukan pengujian agar alat dapat stabil pada kondisi 0 dalam waktu n sekon, serta R read adalah nilai R sebagai referensi untuk menentukan kisaran R dan resolusi alat yang mana pada rangkaian ini digunakan 120Ω.

Hasil uji sampel menggunakan $K_4[Fe(CN)_6]$ menunjukkan bahwa instrumen ini dapat bekerja dengan baik dan mampu bekerja pada scanrate yang berbeda. Pengujian dengan sampel $K_4[Fe(CN)_6]$ menghasilkan voltamogram dengan puncak redoks yang jelas dan simetris, menunjukkan karakteristik sistem reversibel. Gambar 11 menampilkan grafik CV menggunakan sampel $K_4[Fe(CN)_6]$.



Gambar 11. Grafik CV menggunakan sampel $K_4[Fe(CN)_6]$

Hasil pengukuran CV menunjukkan bahwa respon arus oksidasi dan reduksi pada pasangan redoks $Fe(CN)_6^{3-}/4-$ tampak jelas dan simetris pada berbagai nilai scan rate yaitu 20, 30, 40, 60, 80, dan 100 mV/s. Peningkatan scan rate menghasilkan

kenaikan arus puncak yang proporsional, menandakan bahwa proses yang terjadi bersifat reversibel dan dikontrol oleh difusi. Pola tersebut sesuai dengan persamaan Randles–Ševčík (persamaan 2) di mana arus puncak meningkat sebanding dengan akar kuadrat scan rate ($v^{1/2}$). Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa potensiostat portabel mampu merekam karakteristik redoks ferrosianida dengan sangat baik dan hasilnya mendekati potensiostat komersial, yang menandakan stabilitas sinyal serta akurasi pengukuran yang tinggi.

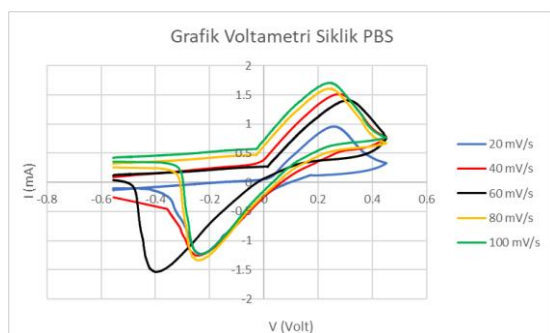
Sementara itu, pengujian PBS yang disiapkan dengan komposisi standar menghasilkan voltamogram tanpa puncak redoks signifikan, sesuai ekspektasi untuk larutan buffer inert. Uji CV ini dilakukan sebanyak 5 kali dengan 5 variasi *scanrate* 20,40,60,80, dan 100 mV/s. Nilai input untuk sampel ini titik awalnya dari -0,5 V, kemudian menuju 0,5 V, dan kembali lagi ke titik awal -0,5 V sehingga didapatkan data CV yang diinginkan. Tabel 3 menampilkan nilai input pada Polarographica untuk uji sampel

Hasil voltametri siklik menunjukkan bahwa larutan PBS menghasilkan kurva dengan respon arus yang melebar seiring dengan peningkatan laju pindai (scan rate). Fenomena ini menunjukkan adanya proses kapasitif pada permukaan elektroda yang dominan akibat sifat elektrolit PBS yang tidak mengandung spesies redoks aktif. Peningkatan arus dengan bertambahnya scan rate umumnya mengindikasikan mekanisme non-faradaik, di mana arus yang terbentuk lebih banyak disebabkan oleh pengisian dan pengosongan lapisan ganda listrik (electrical double layer) daripada reaksi redoks yang sebenarnya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhao et al. (2019) yang melaporkan bahwa PBS sering digunakan sebagai elektrolit netral untuk pengujian kestabilan sistem elektrokimia karena tidak memberikan puncak redoks yang tajam, tetapi mampu memperlihatkan perilaku kapasitif yang baik terhadap variasi scan rate.

Tabel 3. Nilai input pengukuran CV menggunakan sampel PBS

E Initial vs Ref (V)	E Vertex 1 vs Ref (V)	E Vertex 2 vs Ref (V)	E final vs Ref (V)	Scanrate (mV/s)	Num. Of Cycles	Condit. time	R read (Ω)
-0,5	0,5	-0,5	-0,5	20	1	5	120
-0,5	0,5	-0,5	-0,5	40	1	5	120
-0,5	0,5	-0,5	-0,5	60	1	5	120
-0,5	0,5	-0,5	-0,5	80	1	5	120
-0,5	0,5	-0,5	-0,5	100	1	5	120

Hasil uji sampel menggunakan PBS menunjukkan instrumen ini dapat bekerja dengan baik dimana respon arus yang makin melebar ketika *scanrate* dinaikkan. Sebagai pembanding, pengujian dengan larutan PBS menunjukkan perilaku elektrokimia yang berbeda. Kurva CV pada PBS tidak menampilkan puncak oksidasi maupun reduksi yang tajam, namun memperlihatkan peningkatan arus yang melebar seiring dengan kenaikan *scan rate*. Hal ini menunjukkan bahwa proses yang dominan pada PBS bersifat kapasitif akibat pembentukan lapisan ganda listrik pada permukaan elektroda, bukan reaksi redoks yang nyata. Respon arus yang meningkat dengan *scan rate* mengindikasikan mekanisme non-faradaik, di mana arus dihasilkan dari pengisian dan pengosongan kapasitif elektroda. Walaupun grafik PBS tidak sebaik ferrosianida dalam hal kejelasan puncak redoks, hasil ini menunjukkan bahwa alat portabel yang dikembangkan memiliki sensitivitas yang baik dalam mendeteksi karakteristik sistem elektrolit non-redoks. Oleh karena itu, meskipun respon arus PBS terlihat baik dan meningkat dengan kenaikan *scan rate*, kualitas grafiknya tidak sebaik ferrosianida karena tidak adanya reaksi redoks yang signifikan. Hasil ini menegaskan bahwa alat portabel yang dikembangkan telah berfungsi dengan baik dalam mendeteksi perbedaan karakteristik elektrokimia antara sistem redoks aktif dan non-aktif, serta mampu merekam respon kapasitif PBS secara konsisten. Gambar 12 menunjukkan hasil pengujian alat menggunakan sampel PBS.



Gambar 12. Grafik CV menggunakan sampel PBS

Kedua hasil ini mengkonfirmasi bahwa potensiostat portabel berfungsi optimal untuk aplikasi elektrokimia dasar dan dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil membuktikan kemampuan Potensiostat portabel dapat berfungsi dengan baik. Rangkaian potensiostat portabel telah didesain dan diprogram menggunakan MCU Arduino UNO serta ditambahkan komponen IC TL074, DAC, dan ADC eksternal sebagai pemrosesan sinyal. Potensiostat portabel dirakit pada PCB menjadi Arduino Shield sehingga menciptakan desain compact tanpa mengurangi fungsi kinerja rangkaian. Hasil pengukuran $K_4[Fe(CN)_6]$ dan PBS menunjukkan bahwa potensiostat portabel dapat berfungsi dengan baik ditandai dengan puncak redoks yang stabil serta pengukuran yang akurat dan konsisten saat membaca arus.

DAFTAR PUSTAKA

- Arema, B., Oyebamiji Adeoye, M., Obioh, I.B., Adeboye, O.A., 2015. A Simplified Microcontroller Based Potentiostat for Low-Resource Applications. *Open J Met* 05, 37–46.
- Bard, A.J., Faulkner, L.R., 2001. *Electrochemical methods : fundamentals and applications*.
- Caux, M., Achat, A., Var, K., Boitel-Aullen, G., Rose, D., Aubouy, A., Argentieri, S., Campagnolo, R., Maisonhaute, E., 2022. PassStat, a simple but fast, precise and versatile open source potentiostat. *HardwareX* 11.
- Cordova-Huaman, A. V., Jauja-Ccana, V.R., La Rosa-Toro, A., 2021. Low-cost smartphone-controlled potentiostat based on Arduino for teaching electrochemistry fundamentals and applications. *Heliyon* 7.
- Crespo, J.R., Elliott, S.R., Hutter, T., Águas, H., 2021. Development of a low-cost Arduino-based potentiostat.
- Dryden, M.D.M., Wheeler, A.R., 2015. DStat: A versatile, open-source potentiostat for electroanalysis and integration. *PLoS One* 10.
- Elgrishi, N., Rountree, K.J., McCarthy, B.D., Rountree, E.S., Eisenhart, T.T., Dempsey, J.L., 2018. A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *J Chem Educ* 95, 197–206.
- Ibrahim, N.F.A., Noor, A.M., Sabani, N., Zakaria, Z., Wahab, A.A., Manaf, A.A., Johari, S., 2023. We-VoltamoStat: A wearable

- potentiostat for voltammetry analysis with a smartphone interface. *HardwareX* 15.
- Martínez-garcía, A.J., Manuela, L., Martínez-ortiz, F., Molina, A., Gonz, J., 2025. *Electrochimica Acta* Cyclic staircase voltammetry and cyclic voltammetry in current and charge modes for the analysis of the responses of fast redox probes under finite diffusion 525. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146157>
- Meloni, G.N., 2016. Building a microcontroller based potentiostat: A inexpensive and versatile platform for teaching electrochemistry and instrumentation. *J Chem Educ* 93, 1320–1322.
- Muid, A., Djamal, M., Wirawan, R., 2014. Development of a low cost potentiostat using ATXMEGA32, in: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc., pp. 124–128.
- Tichter, T., Gernhard, M., & Vesborg, P. C. K. (2023). PolArStat: An Arduino based potentiostat for low-power electrochemical applications. *Electrochimica Acta*, 469.
- Vyas, S., Thakare, B., Professor, A., 2016. Access Control Application using Android Smartphone, Arduino and Bluetooth Umang Chaudhari, *International Journal of Computer Applications*.