

RANCANG BANGUN POTENSIOSTAT DENGAN FREKUENSI KERJA 1Hz – 40kHz UNTUK KEPERLUAN ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY

DESIGN OF POTENTIOSTAT WITH FREQUENCIES BAND FROM 1Hz – 40kHz FOR ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY

Alvin Leona Rahman¹, Indra Wahyudin Fathonah², Rahmat Awaludin Salam³

1,2,3 Universitas Telkom, Bandung

alvinleonarahman@student.telkomuniversity.ac.id, indrafathonah@telkomuniversity.ac.id,
awaludinsalam@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membuat potensiostat untuk keperluan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* atau yang disingkat EIS yang mampu membaca *input* frekuensi dari rentang 1 Hz sampai dengan 40 kHz dengan hasil keluaran dibandingkan dengan teori. Rangkaian potensiostat akan dihubungkan ke rangkaian Randles Cell yang terdiri dari dua buah resistor dan satu buah kapasitor. Rangkaian Randles Cell tersebut berfungsi menggantikan kerja dari tiga buah elektroda yaitu *working electrode*, *reference electrode*, dan *counter electrode* saat melakukan pengukuran menggunakan metode EIS. Data akhir yang dihasilkan dari penelitian ini berupa nilai impedansi *real* dan imajiner yang diplotkan menjadi satu dan membentuk kurva grafik setengah lingkaran yang dinamakan Nyquist Plot. Terdapat empat percobaan pada penelitian ini dengan mengubah-ubah nilai kapasitor dan menggunakan kapasitor rusak pada rangkaian Randles Cell. Hasil pengambilan data rangkaian potensiostat yang dibuat pada penelitian ini untuk kapasitor 1 μF menunjukkan nilai persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 9,3% dan impedansi imajiner sebesar 43,7%. Untuk kapasitor 10 μF menunjukkan nilai persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 2,3% dan impedansi imajiner nilai sebesar 22,7%. Untuk kapasitor 100 μF menunjukkan nilai persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 10,8% dan impedansi imajiner sebesar 51,2%. Semakin besar nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian Randles Cell frekuensi kerja rangkaian potensiostat menjadi semakin kecil. Rangkaian potensiostat mampu mendeteksi kapasitor yang rusak pada rangkaian Randles Cell dibuktikan pada pengujian menggunakan kapasitor rusak grafik Nyquist Plot yang dihasilkan memiliki anomali yang ekstrem. Anomali tersebut berupa nilai impedansi *real* dan imajiner yang dihasilkan oleh rangkaian potensiostat sangat tidak sesuai dibandingkan dengan perhitungan impedansi secara teori.

Kata Kunci: *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), Elektroda, Potensiostat

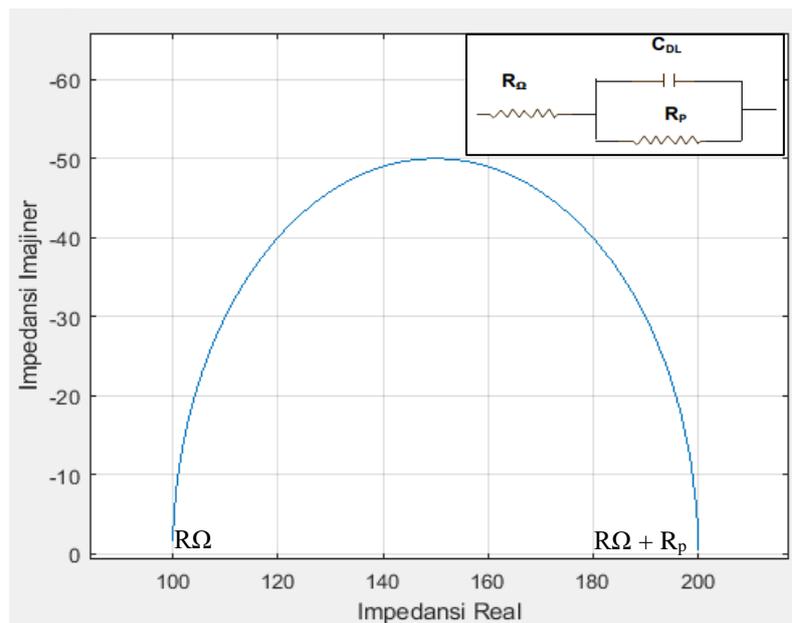
Abstract

This study aims to make a potentiostat for the purpose of *Electrochemical Impedance Spectroscopy* or abbreviated as EIS that able to read to read frequencies input start from 1 Hz until 40 Hz with output compared to the theory. The potentiostat circuit will be connected to a Randles Cell circuit that consist two resistor and one capacitor. T Randles Cell circuit function is to replace the work of three electrode that are working electrode, reference electrode, and counter electrode when uses to measure using EIS method. The final result from this study is in the form of real and imaginary impedance value which are plotted together in one graph and form a semicircle graph curve call Nyquist Plot. There are four experiments in this study by varying the value of capacitor and using a broken capacitor in the Randles Cell circuit. The result from data collection of potentiostat circuit showed for capacitor 1 μF the average percent error value for real impedance 9,3% and for imaginary impedance 43,7%. For capacitor 10 μF the average percent error value for real impedance 2,3% and for imaginary impedance 22,7%. For capacitor 100 μF the average percent error value for real impedance 10,8% and for imaginary impedance 51,2%. The greater the value of capacitor used in Randles Cell circuit the working frequencies of potentiostat circuit become smaller. The potentiostat circuit able to detect a broken capacitor in Randles Circuit which proven by the experiment using a broken capacitor resulted a Nyquist Plot that has an extreme anomaly. The anomaly is in the form of real and imaginary impedance produced by the potentiostat circuit is very inaccordant compared to the theoretical impedance calculation.

Keywords: *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), Electrode, Potentiostat

1. Pendahuluan

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) merupakan suatu metode analisa sifat kelistrikan yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur korosi, kualitas baterai, dan kapasitor [1]. EIS bertujuan untuk mengukur impedansi dari suatu sistem elektrokimia dengan cara mengaplikasikan frekuensi tunggal tegangan bolak-balik (AC) pada sistem elektrokimia tersebut. Sistem elektrokimia akan memberikan respon berupa pergeseran fasa dan amplitudo antara tegangan yang diberikan dan arus yang dihasilkan. Respon tersebut akan ditampilkan dalam bentuk komponen real dan imajiner yang disajikan pada Nyquist Plot [2]. Perjalanan perkembangan EIS dimulai pada tahun 1870 sampai dengan 1890 ketika seorang matematikawan dan insinyur listrik asal Inggris Oliver Heaviside yang dinobatkan sebagai “The Father of Impedance Spectroscopy” mampu memecahkan masalah-masalah praktis seperti perkembangan telegrafi dan teori rangkaian listrik [3]. Kemudian pada akhir abad ke-19 Oliver Heaviside menemukan persamaan untuk mencari nilai nyata impedansi pada ruang sementara. Oliver Heaviside juga diberikan penghargaan atas penemuan istilah seperti impedance, admittance, dan inductance. Selanjutnya pada tahun 1899 terdapat perkembangan impedansi yang berhubungan dengan sistem elektrokimia difusional oleh Warburg [4].



Gambar 1. Nyquist plot dari suatu sistem elektrokimia dan rangkaian Randles Cell yang ekuivalen terhadap sistem elektrokimia tersebut.

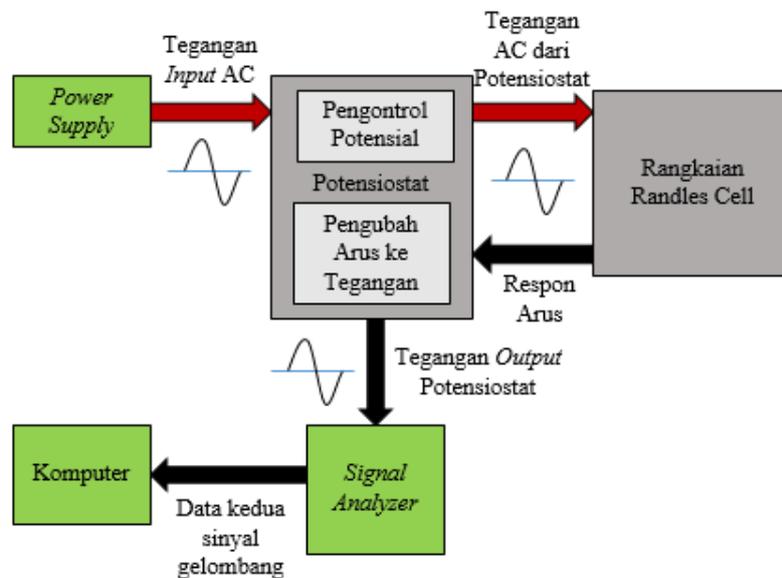
Salah satu komponen pada EIS yang menjadi fokus dalam penelitian ini yaitu potensiostat. Potensiostat merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk eksperimen elektrokimia yang dihubungkan pada tiga buah elektroda yang bekerja dengan cara mengontrol tegangan pada salah satu elektroda dan melihat respon arus pada elektroda penguji. Tiga buah elektroda tersebut akan dimasukkan ke dalam sel elektrokimia dan hasil pengukurannya dapat diolah untuk mendapatkan informasi seperti konsentrasi larutan, derajat keasaman, laju transfer elektron pada kapasitor, dan laju korosi [5]. Ketiga elektroda tersebut akan digantikan menggunakan rangkaian pemodelan yang terdiri dari dua buah resistor dan satu buah kapasitor yang dinamakan rangkaian Randles cell. Rangkaian Randles Cell tersebut merepresentasikan sistem elektrokimia yang terjadi saat dilakukan pengukuran menggunakan metode EIS.

Harga potensiostat di pasaran memiliki harga yang mahal berkisar mulai dari 830\$-11000\$ [6]. Harga yang mahal tersebut dikarenakan potensiostat yang ada di pasaran memiliki spesifikasi yang tinggi. Dua hal yang melatarbelakangi penulis melakukan penelitian ini yaitu penulis ingin membuat potensiostat untuk keperluan pembelajaran dengan skala laboratorium dengan memanfaatkan alat-alat yang ada di Laboratorium Instrumentasi Teknik Fisika Universitas Telkom dan peluang penelitian baru yang diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat memunculkan penelitian-penelitian baru di laboratorium Teknik Fisika Universitas Telkom dengan memanfaatkan potensiostat pada penelitian ini untuk keperluan pengukuran dengan metode Electrochemical Impedance Spectroscopy.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

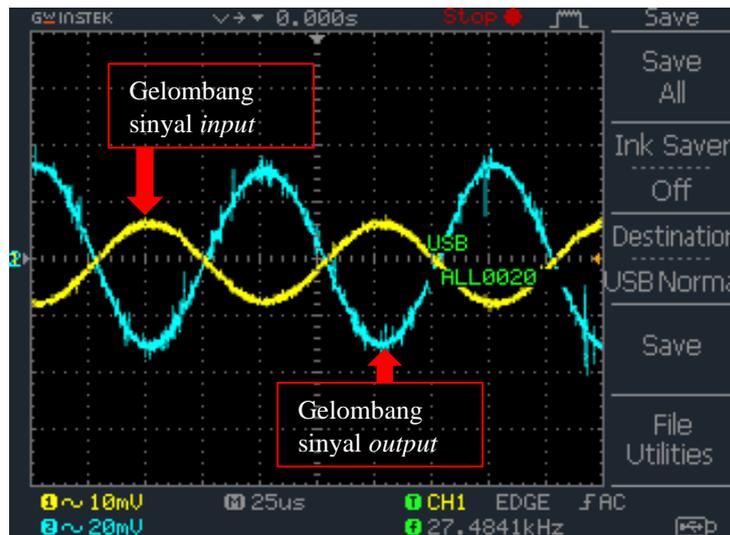
Gambar 2 menunjukkan diagram alur kerja pada pelaksanaan pengukuran menggunakan metode EIS. Rangkaian Potensiostat terkonfigurasi ke komputer yang telah terpasang aplikasi Matlab. Aplikasi tersebut mampu mengolah data kedua gelombang sinyal antara tegangan AC sebagai *input* dengan arus AC sebagai keluaran respon dari rangkaian Randles Cell.



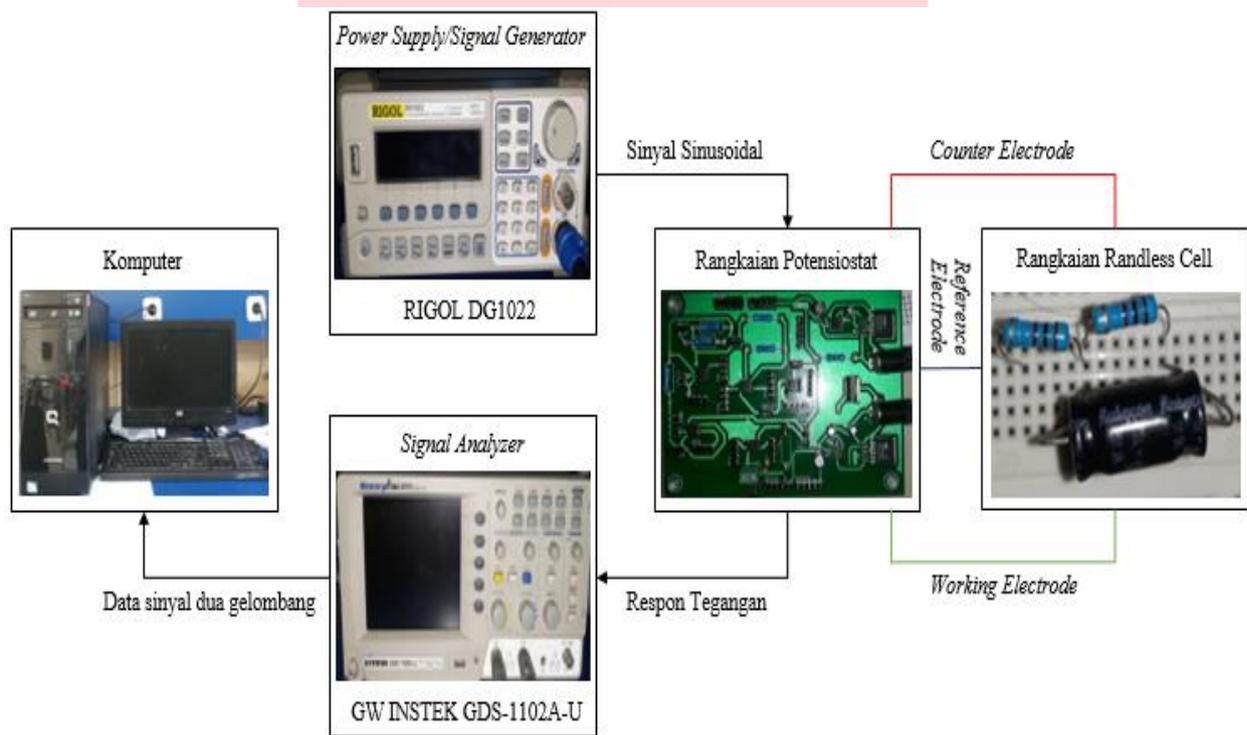
Gambar 2. Diagram alur dari pengukuran menggunakan metode EIS.

Power supply/signal generator berfungsi sebagai sumber tegangan AC yang digunakan sebagai *input* rangkaian potensiostat. Pada *power supply* nilai frekuensi diatur sesuai dengan kemampuan rangkaian potensiostat pada tiap percobaan dan nilai amplitudo diatur di angka 20 mVpp. Nilai amplitudo diatur pada angka tersebut dengan tujuan agar respon sinyal keluaran dari rangkaian potensiostat bersifat *pseudolinear* terhadap gelombang sinyal *input*. Kedua sinyal dapat dikatakan *pseudolinear* apabila frekuensi pada kedua gelombang nilainya sama dan hanya berbeda pada nilai amplitudo dan fasa. Fungsi utama dari potensiostat ada dua yaitu menjaga potensial tegangan yang dialirkan dari *power supply* menuju rangkaian Randles Cell agar tidak terjadi tegangan *drop* dan mengubah respon arus dari rangkaian Randles Cell menjadi tegangan untuk dibaca oleh *Signal Analyzer*.

Gambar 3 menunjukkan bentuk gelombang sinyal *input* dan *output* pada *signal analyzer* berbentuk sinusoidal. Sinyal *input* yang berasal dari *power supply* memiliki persamaan: $V_i = V_o \sin(\omega t \pm \phi_1)$ dimana V_o adalah amplitudo maksimal, ω merupakan frekuensi sudut dalam rad/s yang didapatkan dari $2\pi f$ dimana π adalah 3,14 dan f merupakan frekuensi tiap percobaan. ϕ_1 merupakan fasa pada gelombang *input*. Respon arus yang dihasilkan oleh rangkaian Randles Cell memiliki persamaan gelombang yaitu: $I_t = I_o \sin(\omega t \pm \phi_2)$ dimana I_o adalah amplitudo maksimal dan ϕ_2 merupakan fasa pada gelombang keluaran. Kemudian berdasarkan Hukum Ohm nilai impedansi bisa didapatkan menggunakan persamaan: $Z = V_i / I_t$. Proses untuk mendapatkan nilai impedansi *real* dan imajiner dilakukan di aplikasi Matlab yang ada pada komputer.



Gambar 3. Bentuk gelombang sinyal input dan keluaran potensiostat pada *signal analyzer*.



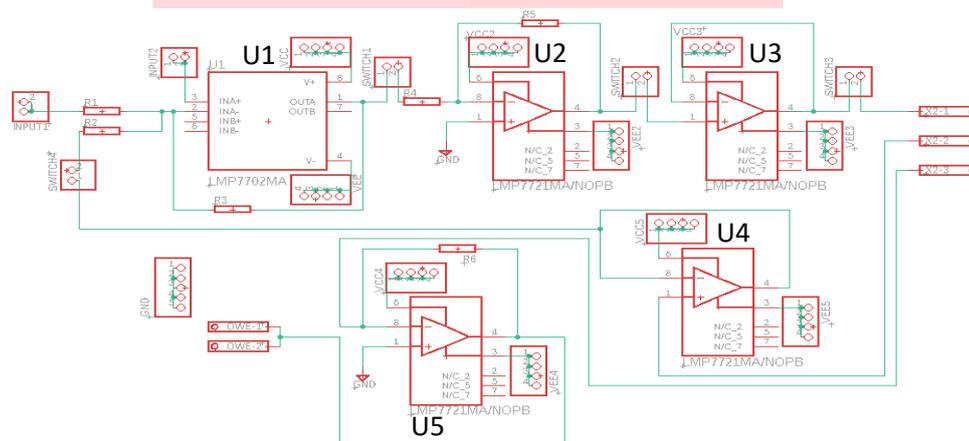
Gambar 4. Diagram alur kerja keseluruhan pada penelitian.

Gambar 4 menunjukkan diagram alur kerja keseluruhan alat yang digunakan pada penelitian ini dan jenis-jenisnya. *Power supply/signal generator* yang digunakan pada penelitian ini adalah *function generator* dari RIGOL dengan jenis DG1022 yang mampu menghasilkan frekuensi dari 1 μ Hz sampai dengan 20 MHz. Keluaran dari *function generator* tersebut berupa tegangan AC dengan bentuk sinyal sinusoidal, frekuensi yang diatur sesuai kebutuhan, dan amplitudo sebesar 20 mVpp. *Function generator* dihubungkan ke kaki *input* rangkaian potensiostat menggunakan kabel *probe*. Tegangan AC tersebut dialirkan melalui rangkaian potensiostat menuju ke rangkaian Randles Cell melalui *counter electrode*. Rangkaian Randles Cell akan memberikan respon arus yang selanjutnya dialirkan menuju *working electrode*. Tegangan keluaran dari rangkaian Randles Cell tersebut akan dialirkan menuju kaki *reference electrode*. Respon arus akan diubah menjadi tegangan oleh rangkaian potensiostat agar dapat dibaca bentuk gelombangnya oleh *signal analyzer* yang pada penelitian ini menggunakan osiloskop dari GW INSTEK dengan jenis GDS-1102A-U yang mampu membaca frekuensi maksimum sebesar 100 MHz. *Channel 1* osiloskop dihubungkan ke kaki *input* rangkaian

potensiostat bersamaan dengan kabel *probe* dari *function generator*. *Channel 2* osiloskop dihubungkan ke kaki *output* rangkaian potensiostat. Respon dua gelombang antara *input* dan *output* direkam oleh osiloskop dan diekstrak menggunakan *flashdisk*. Data gelombang yang tersimpan di *flashdisk* selanjutnya dimasukkan ke komputer untuk diolah menggunakan aplikasi Matlab untuk mendapatkan nilai impedansi *real* dan imajiner.

2.2 Rancangan Rangkaian Potensiostat

Gambar 5 menunjukkan rancangan rangkaian potensiostat yang digunakan pada penelitian ini. Rangkaian tersebut terdiri dari lima buah IC op-amp. Masing-masing IC op-amp memiliki fungsi yang berbeda-beda. Op-amp U1 merupakan *summing amplifier* yang berfungsi untuk menambahkan tegangan yang berasal dari *function generator* dan *reference electrode*. Tegangan yang sudah melewati op-amp U1 akan masuk ke op-amp U2 yang merupakan *inverting*. Op-amp U2 berfungsi untuk membalikkan fasa tegangan yang telah melewati op-amp U1. Tegangan dari U2 akan dialirkan menuju op-amp U3 yang merupakan *buffer*. Op-amp U3 berfungsi untuk menjaga tegangan yang akan dialirkan menuju rangkaian Randles Cell melalui kaki *counter electrode* agar tidak terjadi tegangan *drop* yang diakibatkan oleh impedansi pada sistem elektrokimia yang pada penelitian ini digantikan oleh rangkaian Randles Cell. Op-amp U4 terhubung ke kaki *reference electrode* yang dihubungkan ke kaki *output* dari rangkaian Randles Cell. Op-amp U4 merupakan *buffer* yang berfungsi untuk menahan agar arus tidak masuk ke kaki *reference electrode* dan hanya mengalirkan tegangan yang selanjutnya akan masuk ke op-amp U1. Op-amp U5 terhubung ke kaki *working electrode* dan merupakan *transimpedance*. Op-amp U5 berfungsi untuk mengubah respon arus dari rangkaian Randles Cell menjadi tegangan untuk selanjutnya tegangan keluaran dari op-amp U5 ini dibaca oleh osiloskop.



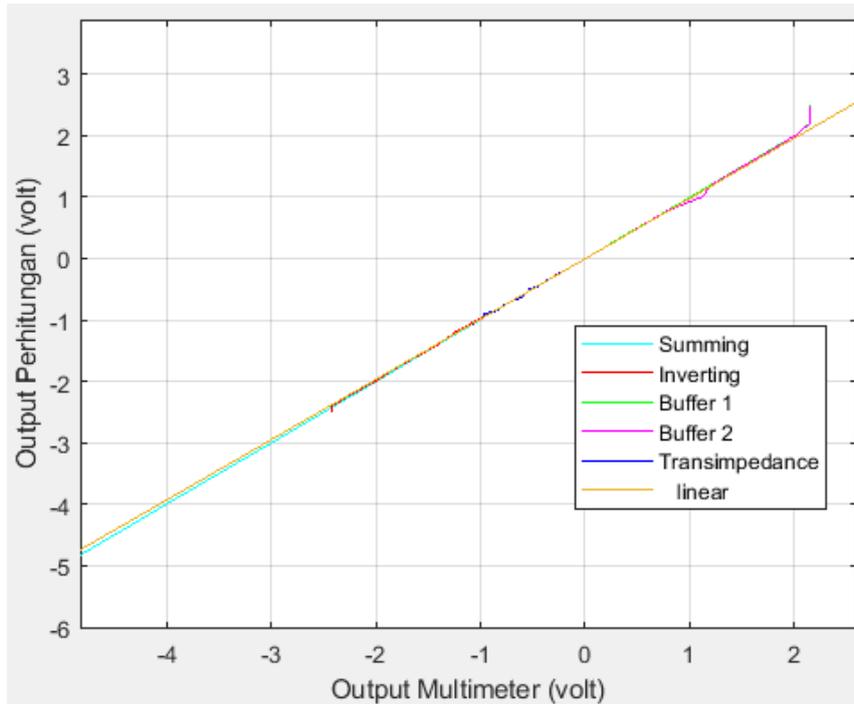
Gambar 5. Rancangan Rangkaian Potensiostat.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian IC Op-amp

Sebelum dilakukan pengambilan data rangkaian potensiostat perlu dilakukan pengujian tiap IC op-amp yang akan digunakan. Masing-masing op-amp akan diuji sesuai dengan fungsinya masing-masing yaitu *summing*, *inverting*, *buffer*, dan *transimpedance*. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan tegangan yang bersumber dari DC *power supply* dan diukur keluaran tegangannya menggunakan multimeter kemudian dibandingkan dengan perhitungan teoritisnya.

Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan antara tegangan keluaran dari op-amp yang diukur menggunakan multimeter (sumbu x) dengan tegangan keluaran dari perhitungan teoritis masing-masing op-amp sesuai fungsinya. Dari grafik perbandingan yang telah dibuat dicari persamaan regresi linearnya untuk mengetahui nilai koefisien determinasi atau R^2 yang menunjukkan seberapa besar korelasi antara tegangan yang terukur di multimeter dengan tegangan dari perhitungan teoritis. Nilai koefisien determinasi atau R^2 untuk *summing*, *inverting*, *buffer*, dan *transimpedance* masing-masing yaitu 0.9979, 0.9986, 0.9838, dan 0.9975 yang menunjukkan bahwa tegangan yang terukur pada multimeter untuk setiap op-amp dengan perhitungan teoritisnya masing-masing memiliki korelasi yang tinggi atau dapat dikatakan data yang dihasilkan akurat.

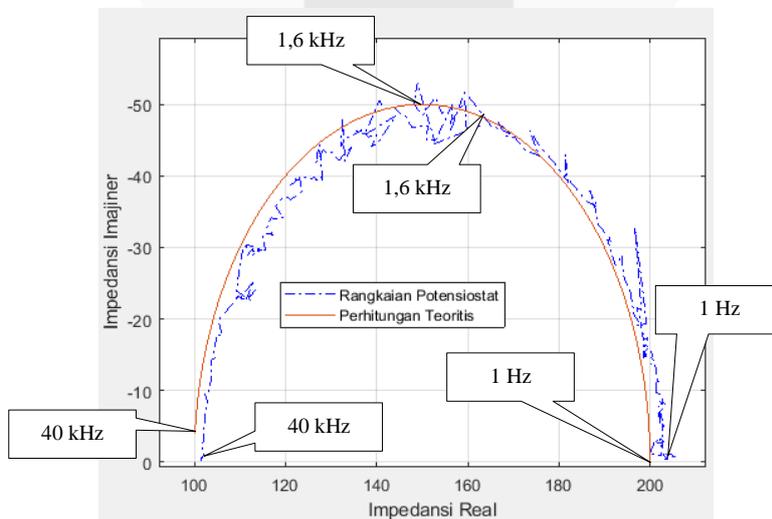


Gambar 6. Perbandingan antara *output* pada multimeter dan *output* perhitungan *summing*, *inverting*, *buffer*, dan *transimpedance*.

Nilai persen *error* untuk setiap data pengujian op-amp didapatkan menggunakan persamaan: persen *error* = (nilai tegangan yang terukur di multimeter – nilai tegangan perhitungan teoritis) / nilai tegangan perhitungan teoritis. Hasil yang didapatkan menunjukkan nilai persen *error* op-amp *summing* sebesar 0.8%, *inverting* sebesar 2.1%, *buffer* sebesar 2.6%, dan *transimpedance* sebesar 2.2%. Nilai persen *error* dari masing-masing op-amp sesuai fungsinya menunjukkan angka yang kecil sehingga dapat dikatakan bahwa op-amp layak digunakan.

3.2 Pengujian Rangkaian Potensiostat dengan Kapasitor C1,C2, dan C3 Pada Randles Cell

Gambar 7 menunjukkan grafik nyquist plot yang berisikan informasi mengenai nilai impedansi *real* pada sumbu x dan impedansi imajiner pada sumbu y. Grafik tersebut dihasilkan dengan memasang kapasitor C1 dengan nilai 1 μ F pada rangkaian Randles Cell. Nilai impedansi *real* terkecil berada di angka 100 ohm dan terbesar di angka 200 ohm. Nilai impedansi *real* terkecil menandakan bahwa impedansi dari rangkaian Randles Cell hanya dipengaruhi oleh nilai $R\Omega$ dengan nilai 100 ohm dan nilai impedansi *real* terbesar menandakan bahwa impedansi dari rangkaian Randles Cell dipengaruhi oleh dua buah resistor yang ada pada rangkaian Randles Cell yaitu $R\Omega$ dan R_p dengan nilai masing-masing resistor yaitu 100 ohm.



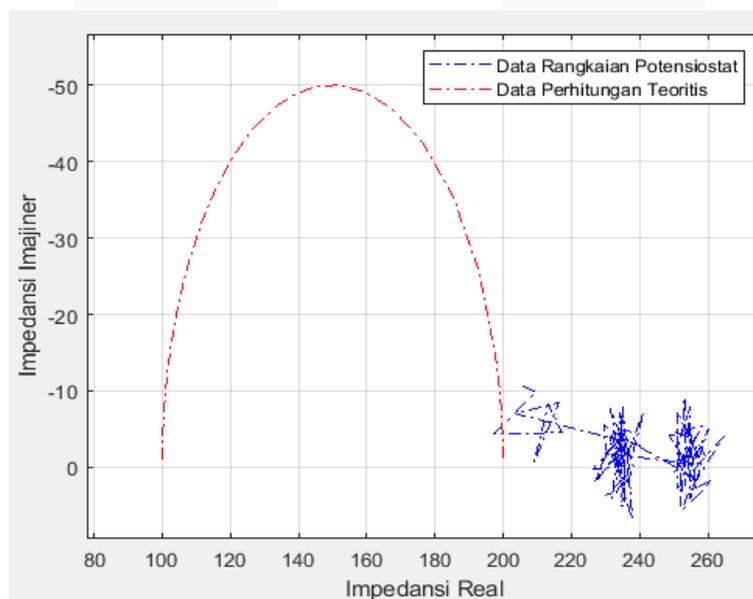
Gambar 7. Perbandingan antara nilai impedansi *real* dan imajiner rangkaian potensiostat dengan perhitungan teoritis.

Pada frekuensi rendah nilai impedansi *real* dan imajiner sudah sesuai antara perhitungan impedansi teoritis dengan rangkaian potensiostat yang diuji yaitu berada di paling kanan dengan nilai impedansi *real* yang paling besar dan impedansi imajiner yang menuju angka nol. Sementara pada frekuensi paling besar berada di sebelah kiri kurva dengan nilai impedansi *real* yang paling kecil dan impedansi imajiner yang menuju angka nol juga. Hal tersebut menandakan bahwa data impedansi yang dihasilkan dari rangkaian potensiostat yang dibuat sudah sesuai dengan perhitungan impedansi teoritis.

Pada percobaan menggunakan kapasitor C2 dengan nilai kapasitor sebesar 10 μF dan kapasitor C3 dengan nilai kapasitor sebesar 100 μF yang dipasangkan pada rangkaian Randles Cell menghasilkan grafik yang sama yaitu sesuai dengan perhitungan teoritisnya. Perbedaan dari percobaan menggunakan kapasitor C1, C2, dan C3 berada pada kemampuan rangkaian potensiostat dalam merespon frekuensi kerja yang diatur-atur nilainya pada *function generator*. Pada kapasitor C1 kemampuan rangkaian potensiostat dalam merespon frekuensi kerja memiliki rentang antara 1 Hz sampai dengan 40 kHz dengan persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 9,3% dan imajiner sebesar 43,7%, kapasitor C2 memiliki rentang antara 1 Hz sampai dengan 10 kHz dengan persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 2,3% dan imajiner sebesar 22,7%, dan kapasitor C3 memiliki rentang antara 1 Hz sampai dengan 1 kHz dengan persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 10,8% dan imajiner sebesar 51,2%. Perbedaan kemampuan rangkaian potensiostat dalam merespon frekuensi kerja disebabkan oleh sifat kapasitif pada rangkaian potensiostat dan rangkaian Randles Cell. Hal tersebut dibuktikan dengan semakin tinggi nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian Randles Cell maka kemampuan rangkaian potensiostat dalam merespon frekuensi kerja menjadi semakin kecil.

3.3 Pengujian Rangkaian Potensiostat dengan Kapasitor Yang Sudah Rusak Pada Randles Cell

Pengujian selanjutnya yang dilakukan pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan kapasitor yang sudah rusak pada rangkaian Randles Cell. Hal ini bertujuan untuk melihat bahwa rangkaian potensiostat yang telah dibuat pada penelitian ini mampu mengeluarkan hasil data yang memiliki anomali yang ekstrem. Anomali data yang ekstrem tersebut menandakan bahwa rangkaian potensiostat yang dibuat sudah bekerja dengan baik dan mampu digunakan untuk pendeteksi sederhana kapasitor rusak. Anomali berupa hasil keluaran nilai impedansi *real* dan imajiner dari rangkaian potensiostat yang sangat tidak sesuai dibandingkan dengan perhitungan impedansi secara teori. Kapasitor dirusak terlebih dahulu dengan cara dipanaskan menggunakan korek api hingga kapasitor tersebut meledak. Gambar 8 menunjukkan grafik Nyquist Plot untuk pengujian rangkaian menggunakan kapasitor rusak.



Gambar 8. Pengujian rangkaian potensiostat menggunakan kapasitor rusak.

5. Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian rancang bangun potensiostat dengan frekuensi kerja dari 1 Hz – 40 kHz untuk keperluan electrochemical impedance spectroscopy dapat disimpulkan bahwa:

1. Rangkaian potensiostat yang telah dibuat mampu merespon frekuensi kerja dari rentang 1 Hz – 40 kHz;
2. Rangkaian potensiostat yang menggunakan kapasitor 1 μF menunjukkan nilai persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 9,3% dan impedansi imajiner sebesar 43,7%. Untuk kapasitor 10 μF menunjukkan nilai

- persen *error* rata-rata impedansi real sebesar 2,3% dan impedansi sebesar 22,7% . Untuk kapasitor 100 μF menunjukkan nilai persen *error* rata-rata impedansi *real* sebesar 10,8% dan impedansi imajiner 51,2%;
3. Nilai kapasitor pada rangkaian Randles Cell berpengaruh pada frekuensi kerja rangkaian potensiostat pada penelitian ini, semakin besar nilai kapasitor yang digunakan maka semakin kecil frekuensi kerjanya begitupun sebaliknya;
 4. Rangkaian potensiostat yang dibuat mampu mendeteksi bahwa kapasitor yang digunakan pada rangkaian Randles Cell sudah rusak.

Referensi

1. Zhen he dan Florian Mansfeld, “*Exploring The Use Of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) In Microbial Fuel Cell Studies*”. Royal Society of Chemistry, 2008.
2. Ametek Scientific Instruments, “*Application Note AC-1 Subject: Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy*”. Princeton Applied Research, 2015.
3. Digby D. Macdonald, . “*A Brief History of Electrochemical Impedance Spectroscopy*”. The Electrochemical Society, 2006.
4. Edward P.R. dan Craig E.B., “*Electrochemical Impedance Spectroscopy: An Overview of Bioanalytical Applications*”. RSCPublishing, 2013.
5. Scheneider dkk, “*Potentiostat Circuit For Electrochemical Cell*”, US. US005466356A, 1995.
6. Fransisco S., José H. dan Andrés M., “*Construction of a Potentiostat to Perform Electrochemical Impedance Spectroscopy*”. Scientific Research Publishing, 2017.
7. Yanhong Liu, Ping Gao, Xuening Jiang, La Li, Jialiang Zhang dan Wei Peng, “*Percolation mechanism through trapping/de-trapping process at defect states for resistive switching devices with structure of Ag/SixC1x/p-Si*”. AIP Publishing, 2014.
8. Alexander, C.K., “*Fundamentals of Electric Circuits Sixth Edition*”. US: McGraw-Hill Education, 2017.
9. Rashid, Muhammad H., “*Microelectronic Circuits Analysis and Design Second Edition*”. Canada: Cengage Learn, 2011.
10. Sedra, Adel S., dan Kenneth C. Smith, “*Microelectric Circuits Seventh Edition*”. US: Oxford University Press, 2015.
11. Chaniotokis and Cory, “*Operational Amplifier Circuits*”. Spring, 2006.